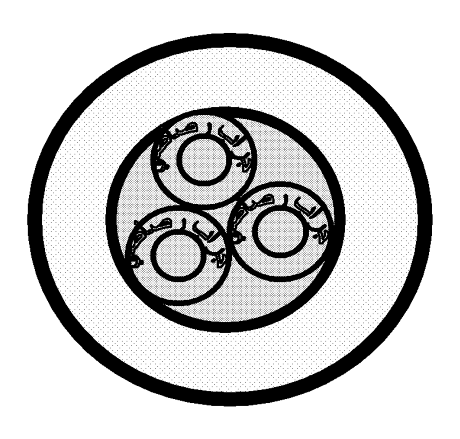
الطبعة الإلكترونية 2014

الكبلات الكهربائية

خصائص الكبلات

أ. د. محمد حامد

كلية الهندسة ببور سعيد



القاهرة 2014

ينحصر محتوي هذا الكتيب في خصائص الكبلات الكهربائية بكافة أنواعها ثم يتعرض لكبلات الجهد العالي ومقنناتها وأسلوب التصميمات الهندسية لها ثم يتناول وسائل الصيانة والتركيبات والتخزين والنقل بجانب الصيانة والإختبارات القياسية ثم يضع إطارا للأعمال الهندسية المطلوبة للكبلات الزيتية جهد عال.

المحتويات

:

مقدمة

تعتمد كافة الأعمال الكهربائية في التركيبات (التمديدات) الكهربائية بشكل علي الكبلات الكهربائية كمغذيات للأحمال وتعتمد كفاءة العمل والأداء علي مستوياتها الفنية ومن ثم كانت الحاجة لوضع نبذة هندسية عن تلك المغذيات وكيفية أوضاع اختيارها وعلي أي الأنواع تعتمد أعمال التصميم كما أن هذه الأعمال التي تهم أعمال الصيانة بشكل عام والتي نحتاج إليها من أجل ضمان سلامة هذه الكبلات خصوصا وأن شبكات التوزيع الكهربائية سواء في المدن الجديدة أو في المجتمعات أو لتغذية الأحمال تعتمد علي الكبلات الكهربائية فكان من الضروري التعرض لكل النقاط التي تخص المهندس والتي تساعده في أداء عمله علي النحو المطلوب.

هذا الكتيب يصلح لكافة المهندسين المتخصصين أو غيرهم من طلاب كليات الهندسة والمعاهد العليا إضافة وكذلك المعاهد العليا والمتوسطة الفنية إلي طلاب الدراسات العليا فهو يلمس النقاط الجوهرية والتي تتعلق بالكبلات بشكل موجز وواضح وباللغة العربية مما يساعد القارئ علي التعمق بشأن هندسة الكبلات الكهربائية ببساطة.

المؤلف

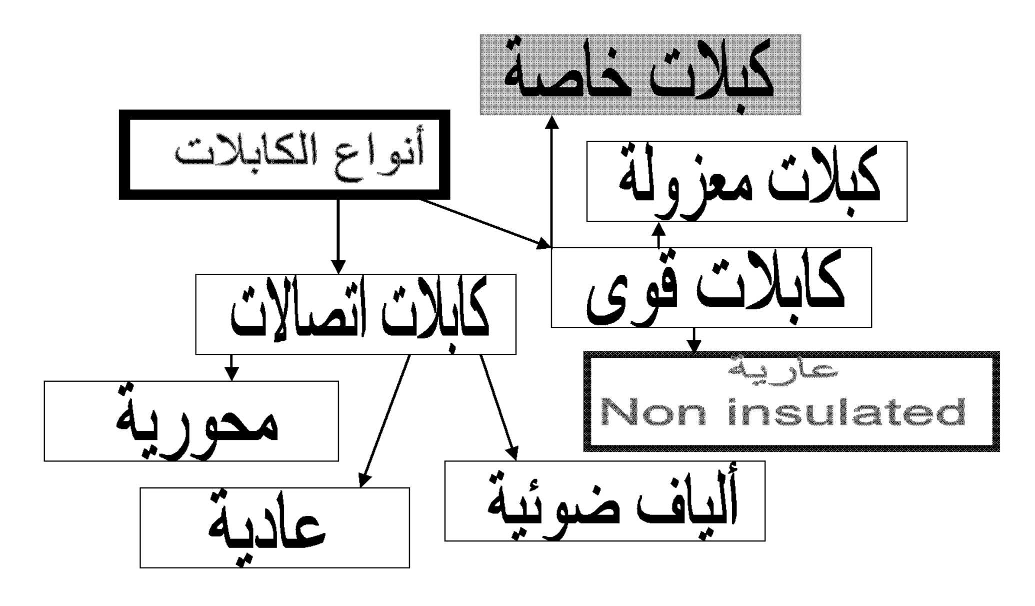
الفصل الأول

الكبلات الكهربائية Electric Cables

الأدوات والمواد الكهربائية تلعب الدور الأهم في كافة التطبيقات العملية علي البسيطة ولهذا المواد الداخلة في الدوائر والشبكات الكهربائية تتقدم الصف للتعامل مع الموضوعات الهندسية، ومن ثم نتعرض في هذا الكتيب إلي موضوع هام بل ويأخذ الدور التطبيقي الأول نتيجة لتواجده في جميع النظم الكهربية داخل المدن في بمحتوي شبكات التوزيع الكهربائية.

من هنا نتعامل مع الكبلات الكهربائية كوسيلة جوهرية للتوصيل بينالأماكن المختلفة وخصوصا داخل المدن والقري وهو ما يجعل موضوع الكابلات الكهربائية هدفا علي الرغم من التقدم العلمي والتكنولوجي الهائل ونحن في القرن الحادي والعشرين.

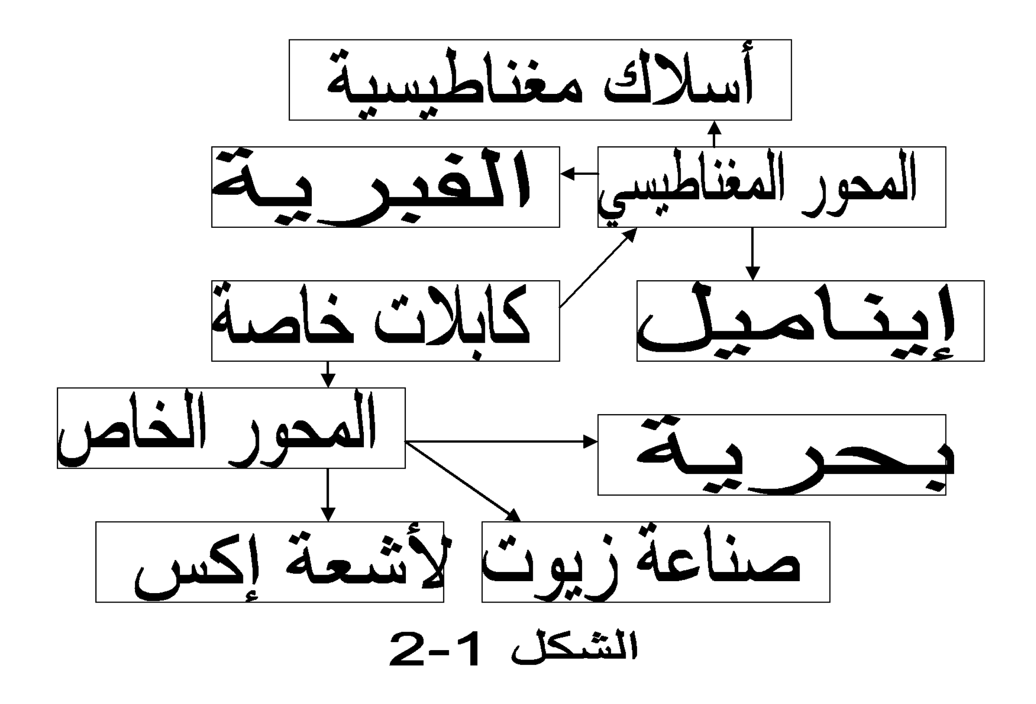
تختلف الكبلات الكهربائية عن الموصلات بشكل عام في احتوائها علي موصل بجانب العزل ومكونات أخري وهو ما يمكنه من العمل تحت الأرض علي عكس الموصلات التي لا تصلح إلا للخطوط الهوائية بالرغم من أنهما يشتركان في معدن الموصل في الحالتين (ألومونيوم أو نحاس) وتتنوع الكبلات كما في الشكل 1-1 وتعتبر الموصلات كأحد حالات الكبلات بدون عزل بشكل عام.



الشكل 1-1

1-1 : الأنواع Types

تشمل كبلات الإتصالات كل من كبلات التليفونات (الهاتف) والهوائيات (الإريال) والمعلومات والتحكم أما كبلات القوي فمنها العارية (غير المعزولة) أو معزولة وتدخل فيها تلك المعزولة جافة أو بالورق المشبع بالزيت أو الزيتية أو الغازية أو بالورنيش أو كبلات خاصة (الشكل 1-2) سواء مغناطيسية أو أخرى المصممة للعمل في أماكن خاصة أو لأغراض معينة أو لأداء عملية محددة.



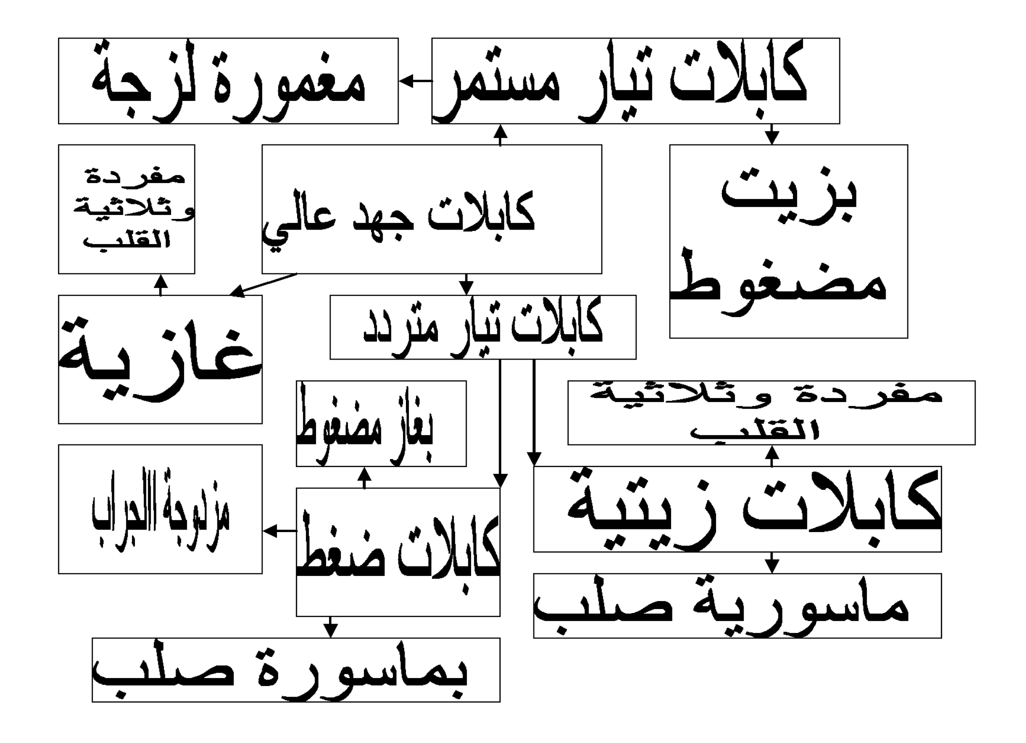
الشكل 1-2

يتم تنويع كبلات الجهد المنخفض في شبكات التوزيع الكهربائية (الشكل رقم 1-3) إلي:

1- كبلات كهربائية زيتية

(أ) الكبلات الكهربائية ثلاثية القلب وتتحمل الضغط الجوي بمستوي 1 للقدرة البسيطة وحتى 15 ضغط جوي للقدرة الضخمة.

(ب) الكبلات الكهربائية وحيدة القلب وتتحمل الضغط السابق أيضا.



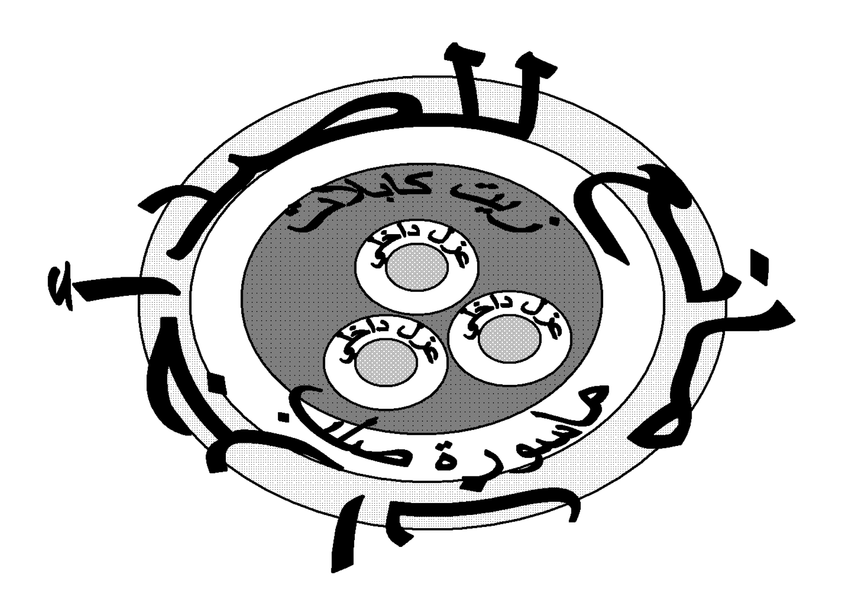
الشكل 1-3

2- كبلات كهربائية غازية

هي تعمل عند ضغط 1، 3، 15 جوي إضافة إلي إمكانية الاعتماد علي الجراب الرصاصي أو الألومونيوم ومنها أحادية وثلاثية القلب.

3- كبلات كهربائية مسلحة مدعمة

بها أصناف عديدة منها الجراب الصلب أو مزدوجة الجراب أو ذو ماسورة بالغاز المضغوط (Compressed gas with polythilin sheath) ويقدم الشكل 1-4 قطاعا بالكبل الزيتي ذو ماسورة ويندرج هنا الكبلات الكهربائية البحرية (الشكل رقم 1 - 5) لتحمل الضغط المائي في الأعماق أو بالمعابر البحرية مثل قناة السويس ومضيق جبل طارق والقناة الإنجليزية وهي باهظة الثمن نسبة للكبلات العادية ولذلك نلجأ إلي الكبلات غير البحرية إذا ما تواجد جسر أو نفقي للمرور من خلاله، ونجد كبلات الجهد المنخفض شائعة الاستخدام ولكنها تتأثر بشدة مع ارتفاع درجة الحرارة مثل كبلات PVC (الجدول 1-1).



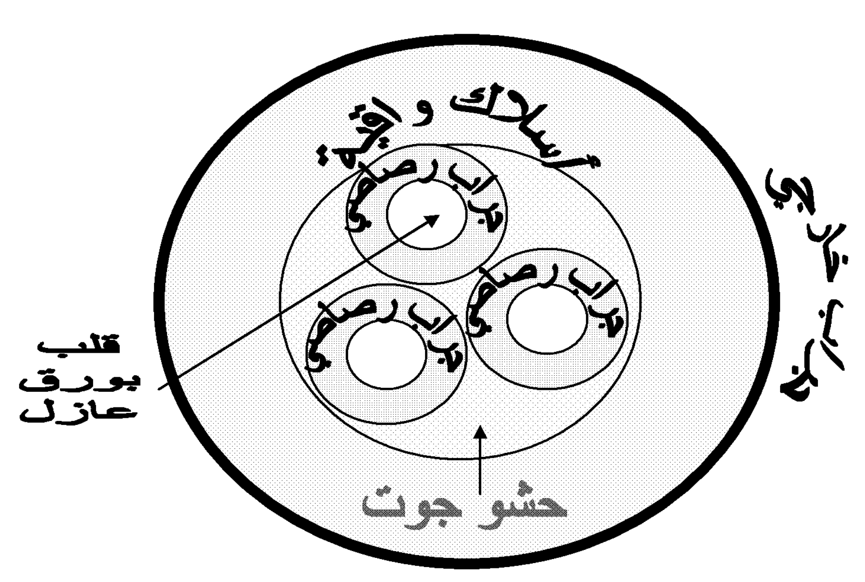
الشكل 1-4

جدول 1 - 1: بيان بأقل قيمة مقاومة للعزل الكهربائي في الكبلات المعزولة بالبلاستيك

جهد ك. ف.	نوع العزل	24° م	50° م	60° م	65° م
1	PVC بولي اثيلين	5 100			0.005 30
6	PVC بولي اثيلين	30 100			0.05 30
10	بولي اثيلين	100		30	
35	بولي اثيلين	100	30		

يبين الجدول 1 - 2 المواصفات الخاصة بكبلات التوزيع الكهربائية المستخدمة في الكهوف والمناجم والأنفاق (الجدول 1 - 2) وتظهر تغيرات هائلة في أنماط الكبلات الكهربائية لتتيح الفرصة في تنوع التعامل معها أما كبلات الناقلات البترولية والبحرية 700 ف متردد أو 1 ك. ف. مستمر وهي التي تعمل عند حرارة بين + 40° م و – 30° م برطوبة نسبية تصل إلي 97 ± 3 % وموصلاتها نحاسية بعزل

مطاطي 5 ميجا أوم / كم سمك تقريبي (1 – 3.2 مم^2) بجراب رصاص 2 – 4.5 مم^2 وتختبر بجهد 2.5 ك. ف. لمدة 15 ق بعزل أكبر من 100 ميجا أوم / كم علي الأقل عند 20° م للنوع المطاطي، أما كبلات أجهزة الأشعة أكس فلها مواصفات نمطية خاصة تمنع التسرب الإشعاعي وتعمل علي جهد 55 – 110 ك. ف. بسمك عزل مطاطي (10.9 – 13.5 مم علي التوالي للجهد) وبقطر حلقة حماية 0.25 مم مع استخدام القطن الأسود الداكن المصقول والفبر الكربوني بطبقات متتالية.



الشكل 1-5

جدول رقم 1-2: المواصفات الأساسية للكبلات الكهربائية المستخدمة في الأنفاق والكهوف والمناجم

جهد (ك. ف.)	مقطع الموصل مم ^{2}	عدد موصلات القلب	عدد موصلات الأرضي
0.5	70 - 1.5	3 – 2	3 – 2 – 1
0.66	35 - 6	3	4
0.5 ، 3 ، 6	70 - 6	3	1
3 ، 6	150 - 10	5	3 - 1 – 0

كبلات الاتصالات ومنها الضوئية وتستخدم في التليفونات وهي عالية القدرة والكفاءة وتحملها عالي للضغط ومانعة للتسرب المائي، بينما كبلات الجهد المنخفض تعمل في ظروف قاسية بمواصفات أعلي (جدول 1-3).

جدول رقم 1 - 3: مواصفات سمك العزل الكهربائي في كبلات جهد التوزيع

جهد (ف)	عزل مطاطي	عزل بلاستيك
500	2.4– 1	2.4– 1
1000		2 - 1.6

وتظهر كبلات الاتصالات بالقدرة الضئيلة للتيار الخفيف وذبذبة استخدام محددة بمقاومة تقرب من 31.9 أوم / كم وسعة 25 نانو فاراد / كم عند 20 ْ م (الجدول 1-4) كما أن الجدول رقم 1-5 يضع الخواص الكهربائية للكبلات التليفونية المقواة عديدة الأسلاك والمستخدمة بنجاح عمليا والتي تساعد في عمليات التفتيش الهندسي للوقوف علي صلاحيتها بينما هذه الصفات تتغير قليلا مع الكبلات الخزفية Enamel والفبرية Fiber (الجدول رقم 1-6) وتتميز بصغر السمك والحجم والجودة الفائقة في التشغيل.

جدول رقم 1-4 : الخواص الكهربائية لكبلات الاتصالات العادية عند 800 هيرتز / كم

قطر مم	مقاومة Ω	حثية mH	سعة nF	معوقة Ω
0.5	184	0.7	31	1040
0.6	123	0.7	32	880
0.7	92.5	0.7	32.5	730
0.8	69.8	0.7	33	650
0.9	54.6	0.7	33.5	570
1	44.3	0.7	34	540
1.2	30.8	0.7	34.5	425
1.4	22.6	0.6	35.5	360
1.8	13.7	0.6	37	275

تنتشر الكبلات (مطاطية و بلاستيكية العزل) في شبكات التوزيع 380 / 220 ف ومنها أنواعا كثيرة ومتنوعة من حيث شكل القلب أو الجراب أو العزل الداخلي سواء لكل قلب أو بين الأوجه أو مع الأرض ومنها:

1- **كبلات بعزل بولي اثيلين وجراب PVC.**
2- **كبلات PVC غير مقواة بدون جراب.**
3- **كبلات PVC مدعمة بشرائط صلب مزدوجة بجراب أو بدونه.**
4- **كبلات مطاطية (بولي كلور وبرين) ومنها نوعان (غير مقواة وبدون جراب – مدعمة بشرائط صلب مزدوج).**
5- **كبلات مطاطية العزل بجراب رصاص ومنها ثلاث حالات (بدون جراب – مدعمة بشرائط صلب – مدعمة بأسلاك صلب بالجراب أو بدون جراب) وعادة ما يزيد العزل عند النهايات لرفع مستوى العزل السطحي لمنع حدوث شرارة.**

جدول رقم 1 - 5: الخواص الكهربائية لكبلات التليفونات المستخدمة في المدن الكبرى لكل كم طولي

القطر مم	مقاومة Ω	سعة متوسطة حتى 50 زوج μF	أقصى سعة حتى 50 زوج μF	سعة متوسطة أكثر من 50 زوج μF	أقصى سعة أكثر من 50 زوج μF
0.4	148	0.05	0.055	0.05	0.055
0.5	95	0.055	0.055	0.05	0.055
0.6	65.8	0.041	0.045	0.03	0.043
0.7	48	0.042	0.046	0.04	0.044

أما بالنسبة لكبلات القوى Power Cables وبالرغم من ارتفاع سعرها إلا أنها تتميز عن الأسلاك الهوائية بما يلي:

1- انخفاض معامل الخطورة Risk Factor خصوصا عند قطع أحد الأسلاك.

2- ارتفاع معامل الاعتمادية Reliability لأن التيار لا ينقطع بسببه تكراريا نسبة إلي الخطوط الهوائية.

3- لا تتأثر بالصواعق Surges والعواصف والأعاصير والظروف المناخية القاسية.

جدول رقم 1- 6: بيان بالأسلاك المغناطيسية (الخزفية والفبرية)

عزل الأسلاك	قطر القلب (مم)	سمك العزل (مم)
نسيج قطني مزدوج الطبقات	5.2 – 0.38 مستطيل (15/2.1 – 5.5/0.9)	0.33 – 0.22 0.44 – 0.27
خزف بالراتنجات وطبقة من نسيج القطن المغزول	2.1 – 0.38	0.22 – 0.17
طبقة خزفية وطبقة من الحرير الطبيعي	1.56 – 0.05	0.16 – 0.08
طبقة خزفية وطبقة فبر مغسول	1.3 – 0.06	0.17 – 0.09
طبقات متتالية من ورق الكبلات أو التليفونات	2.1 - 1.2 5.2 – 2.26 مستطيل (19.6/3 – 5.6/1)	1.2 – 0.3 5.76 – 0.3 1.92 – 0.45
طبقات من ورق الكبلات	مستطيل (14.5/2.1 – 5.6/1.8)	4.4 – 2
ثلاث طبقات فبر مغسول وطبقة قطن مغزول	مستطيل (14.5/2.1 – 5.5/0.9)	0.53 – 0.38

4- لا تتأثر بوجود الطيور Birds وما تسببه من أعطال في الأسلاك الهوائية.

بينما من الجهة الأخري تظهر لها بعض العيوب غير الجوهرية مثل:

1- غلاء سعرها وبالتالي التكلفة.

2- ارتفاع قيمة التيارات المتسربة إلي الأرض Stray Currents to Earth.

هذه الكبلات عموما لا بد وأن تتوافر فيها عددا من المبادئ الأساسية وهي:

1. **منع أي تحميل زاد عليها (متجاوز) Over Loading.**
2. **ضرورة زيادة سمك العزل لرفع درجة الأمان Safety Factor والاعتمادية عند جهد التصميم.**
3. **يجب تصنيع جميع المكونات من مواد مستقرة Stable كيميائيا وفيزيائيا.**
4. **تحتاج إلي حماية ميكانيكية لتحمل الضغوط الخارجية أثناء التركيب والتشغيل.**

من أهم هذه الكبلات وجدنا الكبلات البحرية Marin وهي التي يجب أن تتوافر فيها بعضا من الخصائص منها:

1. **أن توضع في أماكن بعيدة عن التيارات المائية وتأثيرها الديناميكي.**
2. **ضرورة وضع علامات إرشادية وتحذيرية عن وجود كبلات أمام العاملين بالملاحة البحرية.**
3. **يجب تلافي اللحام في الكبل.**
4. **يجب التوصيل بين نقاط ثابتة بصناديق التوصيل Connection Box.**
5. **يتم اختيار الموقع في أقصر مكان عبور مائي.**
6. **ألا يكون الموقع به أعمال جرف ممكنة وبعيدا عن الأرصفة والموانئ.**
7. **الالتزام برمي الكبل في خط مستقيم وفي حفرة بقاع البحر أو النهر علي عمق 50 – 60 سم من القاع تغطى بشريحة أسمنتية.**
8. **استخدام مواسير صلبة لتمرير الكبل من داخلها ويشترط أن يكون قطرها الداخلي ضعف القطر الخارجي للكبل تقريبا.**
9. **وضع نهايات علي الضفتين وترك جوالي 30 م للبحار و 10 م للنهر علي كل جانب بصفة احتياطية.**
10. **ترص الكبلات في عدد من الحفر بالقاع متجاورة بينها ما لا يقل عن 25 سم في مجموعات عند الحاجة إلي ذلك.**

أما عن أعمال التركيب والتي تعتمد علي نوعية القاع ووقت العمل صيفا أم شتاءا أو في موقع جليدي أو غيره وكذلك طريقة التركيب المتبعة ولهذا فهي تحتاج إلي التنظيم التالي:

1- تجميع الكبلات في مجموعات (متجاورة).
2- التركيب لمجموعات الكبلات علي مراحل تبعا للحاجة المطلوبة من الأحمال الكهربائية.
3- عدم تداخل المجموعات منعا للضرر الناتج عن أعمال التركيب التالي.
4- تتم أعمال التركيب بواسطة غواصين متخصصين في هذه الأعمال.
5- اختبار الكبل بعد التركيب وبعد كل إضافة لوصلة جديدة.
6- وضع خرائط مساحية ثلاثية الأبعاد لتحديد مسار الكبل وصناديق التوصيل والبيانات الفنية الخاصة بها.

ومن أهم صفات هذه الكبلات نجد:

1- خفة الوزن.
2- مقاومة التفاعلات الكيميائية.
3- خواص ميكانيكية عالية مع درجات الحرارة العالية.
4- مضاد للشرخ.
5- لا تتأثر بالتآكل الحراري الزمني.
6- مجال التوزيع الحراري جيد ومتماثل.
7- خواص كهربائية مميزة.

2-1 : الخواص الكهربائية Characteristics

يعتمد تصميم الكبلات الكهربائية علي توفير الحماية الذاتية بأقل تكلفة مع وضع المرونة وأسلوب الرمي أو الصيانة أو الكشف والتفتيش في الاعتبار مما يستلزم الدقة في اختيار مكونات الكبل وصفاته الهندسية ومن أهمها:

1- مقنن التيار.
2- مقنن جهد التشغيل.

3- شكل تغير الأحمال الكهربائية علي الكبل.
4- الاحتمالات لقيمة وشكل موجات الجهد الصاعقي.
5- طريقة رمي الكبل.
6- الظروف البيئية المحيطة.

تعطي المعاملات الكهربائية للكبلات مؤشرا لحالة الكبلات ويتم حساب الكبلات ضئيلة التيار تبعا للتيار والمقاومة الميكانيكية للعزل بينما ينضم إليهما التأثير الحراري ويصبح أساسيا في التصميم للجهد الأعلى ومن أهم المؤشرات الكهربائية تظهر زاوية العزل $\tan\ \delta$ ويتبع في التصميم ما يلي:

1- اختيار مقطع القلب المعدني المناسب للتيار المقنن.
2- حساب توزيع المجال وسمك العزل الكهربائي الضروري.
3- حساب تأثير الانتقال الحراري.
4- تعديل ما سبق حسابه تبعا للتأثير الحراري والتأكد ثانية.
5- يمكن إدخال نظم التبريد الحراري عند الضرورة في الأحمال العالية سواء بالزيت (الساري أو المضغوط) لنقل الحرارة إلي الخارج.
6- التأكد مرة أخري.

ينتج المجال الكهرومغناطيسي في العزل لكبل بقطر r مع التيار المتردد حيث يظهر المجال الكهربائي V بدلالة الشحنة Q في وحدة العزل فراغيا والنفاذية التخلخلية ($\varepsilon\ \varepsilon_o = 0.0885$ فاراد / م) بشدة قدرها فنحصل علي:

$$\nabla^2 V + \frac{Q}{(\varepsilon\ \varepsilon_o)} = 0 \qquad (1-1)$$

حيث القيمة النسبية للعزل ε والتحويلية (Laplacian) لابلاس ∇^2 وذلك مع حرارة العزل T فيكون معدل انتقال الحرارة من وحدة حجم العزل q كثافته γ بتوصيلية حرارية λ وسعة حرارية C:

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = 0 = \frac{\gamma C}{\lambda} \partial T/\partial t \qquad (1\text{-}2)$$

بهذه المعادلة نستطيع تبسيط الصورة ومن ثم نحصل علي المعادلة الأخيرة في المحاور الأسطوانية (مسافة z وزاوية ϕ):

$$\nabla^2 V = (1/r)\, \partial/\partial r\, (r\, \partial V/\partial r) + (1/r)\, \partial V/\partial \phi + \partial V/\partial z$$
$$\nabla^2 V = (1/r)\, \partial/\partial r\, (r\, \partial V/\partial r) \qquad (1\text{-}3)$$

باعتبار عدم وجود شحنات كهربائية حجمية في العزل الكهربائي وعدم تراكم حراري في منطقة العزل نصل إلي:

$$\nabla^2 V = \nabla^2 T = 0 \qquad (1\text{-}4)$$

بالنسبة للكبلات الكهربائية دائرية المقطع وحيدة القلب تكون المعادلة بثابت تكامل A:

$$A = (r\, \partial V/\partial r)$$

هكذا نصل إلي المعادلة التفاضلية

$$(1/r)\, \partial/\partial r\, (r\, \partial V/\partial r) = 0 \qquad (1\text{-}5)$$

لجهد القلب المعدني V_o بقطر r_o مع فرض أن جهد الجراب صفريا نستنتج ثابت التكامل بالقيمة:

$$A = -\frac{V_o}{\ln (R/r_o)} \qquad (1\text{-}6)$$

ونحصل علي قيمة شدة المجال الكهربائي E بالصيغة:

$$E = - \partial V/\partial r = \frac{V_o}{r \ ln (R / r_o)} \qquad (1-7)$$

هذه العلاقة صحيحة فقط إذا كان العزل ثابتا بين الجراب والقلب وحيث أن الحلي الرياضي يصعب مع عدم ثبات هذا العزل الكهربائي فيلزم محاولة توزيع المجال بالتساوي علي طول عمق العزل وهذا لا يمكن تحقيقه عمليا ولكن يمكن تحسين الفارق بين طرفي شدة المجال الأقصى والأدنى ولهذا ظهرت الحاجة إلي تعدد طبقات العزل داخل الكبل ويكون العزل الأقوى هو الأقرب من القلب المعدني للكبل، وكبلات التيار المستمر ذات توصيلية γ مقلوب المقاومة) مع تيار امتصاص عن تسرب الشحنات الساكنة المتراكمة علي الأسطح والذي يتأثر بالثابت الزمني لحالات الانتقالية بينما لكبلات التيار المتردد يطولا لثابت الزمني أو يقصر ويصبح توزيع المجال بتزحزح كهربائي للشحنات D تبعا للصيغة:

$$D = (\varepsilon \ \varepsilon_o) \ E = - (\varepsilon \ \varepsilon_o) \ \partial V/\partial r \qquad (1-8)$$

إذا قل هذا الزمن عن نصف دورة فتزيد كثافة التيار j :

$$j = \gamma \ E = - \gamma \ \partial V/\partial r \qquad (1-9)$$

ويكون الانتقال الحراري في وحدة الحجم q محددا بالعلاقة:

$$- \lambda \ \partial \tau/\partial r = q \qquad (1-10)$$

فالزيادة الحرارية τ وهي التي تعبر عن الفرق الحراري بين حرارة الجراب T_{sh} ودرجة الحرارة عند بداية العزل T:

$$\tau = T - T_{sh} \quad (1\text{-}11)$$

ومن الوضع التماثلي فيمكننا اعتبار:

$$\begin{aligned} D &\sim j \approx q \\ (\varepsilon\, \varepsilon_o) &\sim \gamma \sim \lambda \end{aligned} \quad (1\text{-}12)$$

فنحصل علي المعادلة التفاضلية التالية

$$\begin{aligned} \partial V/\partial r &\sim \partial \tau/\partial r \\ V &= T \end{aligned} \quad (1\text{-}13)$$

باعادة توزيع الشحنات علي السطح S لمنع تيار التسرب I مع الحرارة الكلية Q_t داخل السطح المغلق فتكون المعادلات التكاملية:

$$\begin{aligned} \int D\, dS &= Q \\ \int j\, dS &= I \\ \int q\, dS &= Q \end{aligned} \quad (1\text{-}14)$$

نظرا للحاجة إلي إستكمال التحليل الرياضي علينا التبسيط بفرض عدم تواجد مصدر حراري خارجي بجانب اختفاء ظاهرة التكتل الفراغي للشحنات (Space Charge) فنجد للوحدة الطولية من الكبل مع الفقد الحراري p_c الممثل للحرارة الكلية داخل الكبل نجد أن:

$$-\,\partial V/\partial r = E = \frac{Q}{2\,\pi\, r\, \varepsilon\, \varepsilon_o} = \frac{I}{2\,\pi\, r\, \gamma} = \frac{p_c}{2\,\pi\, r\, \lambda} \quad (1\text{-}15)$$

بتكامل المعادلة السابقة نستنتج السعة C للكبل

$$C = \frac{Q}{V_o} = \frac{2\pi\, r\, \varepsilon\varepsilon_o}{\ln R/r_o} \tag{1-16}$$

وشدة المجال الكهربائي وضع بالعلاقة

$$E = \frac{V_o}{r\, \varepsilon \int dr / r} \tag{1- 17}$$

ونحصل علي قيمة مقاومة العزل R_{ins} بالصيغة

$$R_{ins} = \frac{V_o}{I} = \tfrac{1}{2}\, \pi\, \gamma\, \ln R/r_o \tag{1-18}$$

أما الزيادة الحرارية الأعلى τ فوق درجة حرارة الجراب الخارجي فتتحدد بالقيمة:

$$\tau = p_c\, \pi\, \lambda \;\; \ln R/r_o \tag{1-19}$$

ومن الصورة العامة لقانون أوم تكون المقاومة الحرارية لوحدة الطول S_{ins} هي

$$S_{ins} = \tfrac{1}{2}\, \pi\lambda \;\; \ln R/r_o \tag{1-20}$$

مما يشير إلي إمكانية التقارب بين المعاملات المختلفة بالشكل:

$$1 / C \sim R_{ins} \sim S_{ins} \qquad (1\text{-}21)$$

هذا التشابه نتيجة اعتمادهم علي المعامل الهندسي للنسبة بين أبعاد الكبل والتي ظهرت تحت اللوغاريتم ولذا يمكننا الحصول علي بقية المعاملات إذا تعرفنا علي أيهم بالاستعانة بهذه النسبة بل وتقدم الجداول التطبيقية هذا النسق بشكل جيد ونستعرض بعض الحالات فيما يلي:

أولا: كبلات التيار المستمر

بوضع الفروض العامة السابقة في التحليل الرياضي وعند التحميل للجهد بدون تيار بالكبل نستطيع التعامل مع التأثير الحراري نتيجة الفقد الكهربائي تبعا لقانون جول حيث يتم التصرف الحراري علي أبعاد القلب والعزل الكهربائي مما يقلل مقاومة العزل مع ارتفاع الحرارة وتتغير التوصيلية الحرارية معتمدة علي شدة المجال النسبي E_R منسوبا إلي الجراب الخارجي والفقد في الجراب γ_o تبعا للصيغة:

$$\gamma = \gamma_o \; e^{(\alpha\tau)} (E/E_R)^k = \gamma (R / r)^m \qquad (1\text{-}22)$$

كما يظهر الشكل رقم 1- 6 مدي تأثير هذا المعامل (m) علي مستوى تدرج شدة المجال داخل العزل، حيث أن هذا المعامل يتحدد لكل نوعية عزل فمثلا للكبلات البولي اثيلين قيمته 21 - 24 بينما للعزل الورقي المغمور بالزيت تصل قيمته إلي الصفر كما أن النسبة بين شدتي المجال تأخذ الصورة:

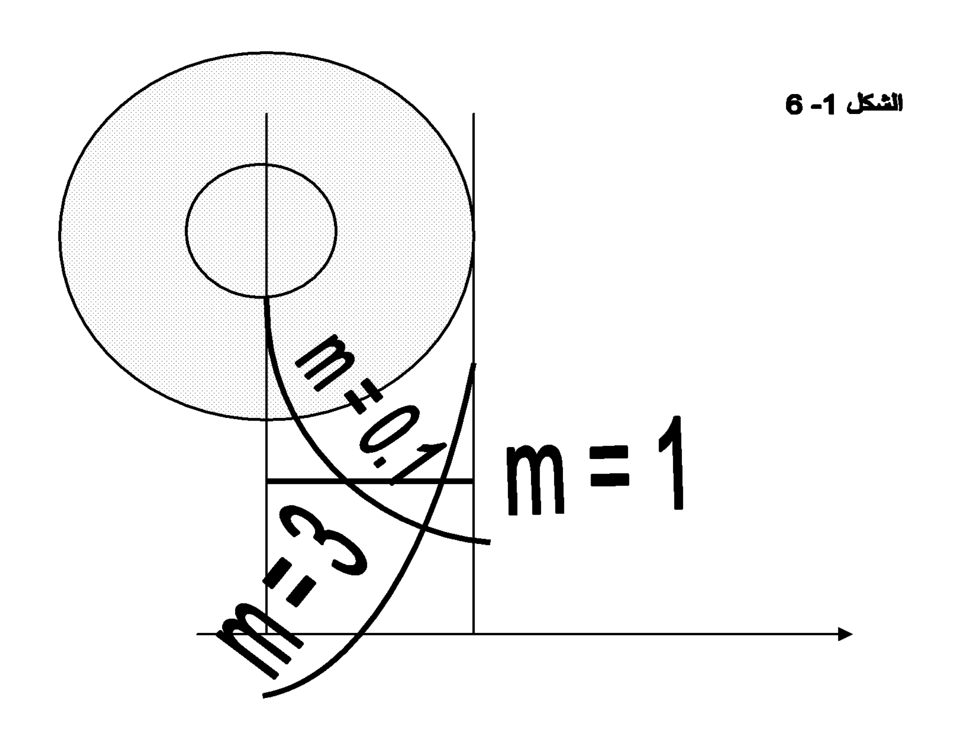
$$(E/E_R)=\gamma_R\, R/r\gamma \,,\; m= [k + (p_c\alpha/2\pi\lambda)]/(k+1) \qquad (1\text{-}23)$$

ثانيا: كبلات وحيدة القلب

يتميز الكبل المفرد بالتماثل الهندسي حول المحور مما يجعل التوزيع متجانس للمجال الكهربائي والمغناطيسي وكنه يكون مرتفعا عند القلب ويقل بشدة بجوار الجراب ولذلك يفقد العزل البعيد عن

القلب الكثير من قدرته وإمكان قلة الضغط الكهربائي عليه وبذلك تزداد التكلفة بينما نستطيع تحديد معامل الاستغلال الفعلي η بدلالة النسبة $N= R/r_o$ بمجال متوسط E_{av} بالمعادلة:

الشكل 1- 6



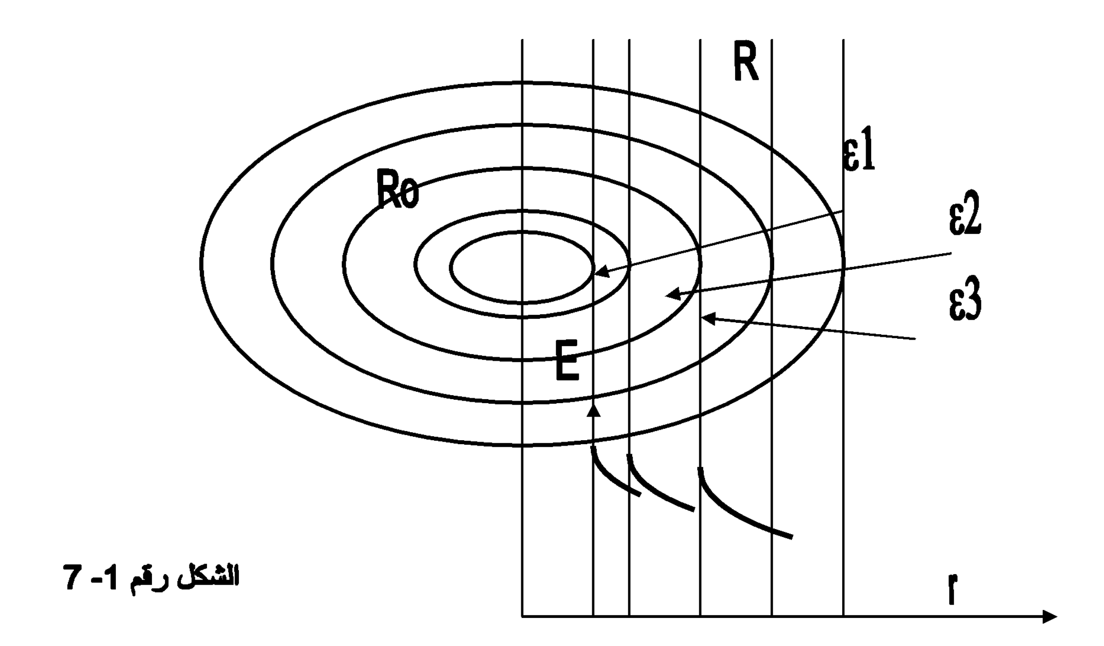
$$\eta = \frac{E_{av}}{E_m} = \frac{r_o \ln R/r_o}{(R- r_o)} = \ln N/(N-1) \qquad (1-24)$$

سمك العزل الكهربائي يحدد الجهد التشغيلي الأقصى للكبل ويكون معامل الاستغلال مساو للوحدة لثبوت المجال الكهربائي ومساوية النسبة بين جهد التشغيل وسمك العزل وهذا محتمل في كبلات التيار المستمر علي عكس كبلات التيار المتردد حيث يتم استخدام مواد عازلة متتالية كطبقات فوق بعضها كي لا يكون معامل الاستغلال ضئيلا كما في الشكل 1 - 7 وبذلك نرفع قيمة معامل الاستغلال كما يعرف هذا الأسلوب باسم العزل المتدرج Graded Insulation وتصبح شدة المجال علي النحو:

$$E = V / \varepsilon r\{ln (r_1/r_o) / \varepsilon_1+1/ ln (r_2/r_1) / \varepsilon_2+\ldots+ ln (R/r_{n-1}) / \varepsilon_v\} \quad (1\text{-}25)$$

وتكون قيمة السعة هي:

$$C = \frac{2 \pi \varepsilon_0}{\Sigma \{[ln (r_i / r_{i-1}) / \varepsilon_i]\}} \quad (1\text{-} 26)$$



الشكل رقم 1- 7

ففي الحالة المثالية إذا تساوى المجال الأقصى علي كل نوعية عزل في كل طبقة عازلة i بجانب تساوي النسبة بين أقصى وأدني شدة مجال في كل طبقة فتكون النفاذية هي:

$$f_\iota = E_1 / E_{\iota+1}$$

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_{\iota+1} = k_\iota$$

ويكون الناتج لقيمة شدة المجال هو

$$E = \frac{V}{\varepsilon\, r \{ln\,(r_1/r_o) / \varepsilon_1 + ln\,(R/r_1) / \varepsilon_2\}} \qquad (1\text{-}27)$$

حيث نجد معامل الاستغلال بالصورة

$$N = \frac{R}{r_o} = k_{n-1}\;f_{n-1}\;e^{(\psi/\kappa n-1)} = k\,f\,e^{(\psi/\kappa)}$$

(1-28)

$$\psi = \frac{V}{r_o\,E_{1m} - ln\,(k\,f)}$$

بشرط الحفاظ علي أفضل استغلال تبعا للشرط التالي والممكن للكبلات المطاطية والبلاستيك كما نستخدم كبلات مزدوجة الطبقات

$$\frac{f_{i+1}\;k_{i+1}}{f_i\;k_i} > 1$$

(1-29)

&

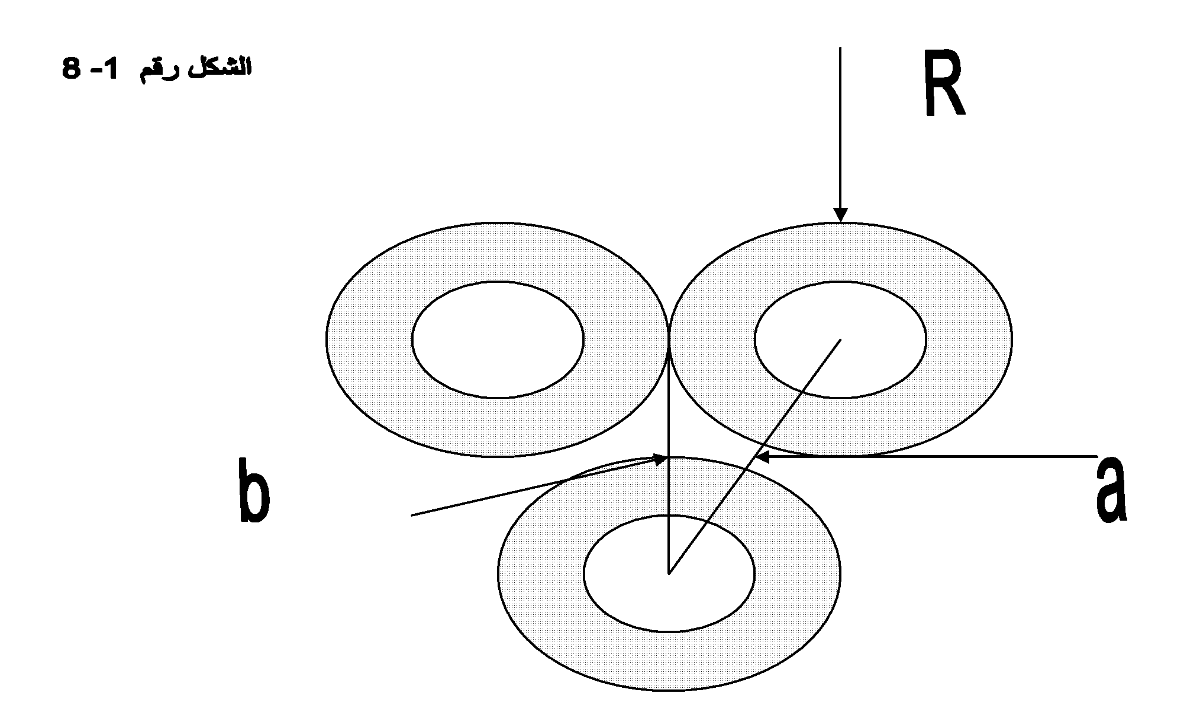
$$f_i\;k_i > 1$$

ثالثا: كبلات كهربائية ثلاثية القلب

لما كان المجال الكهربائي متجانسا في الكبلات مفردة القلب يظهر التباين هنا مع الكبلات الكهربائية ثلاثية القلب فيجعلنا الاعتماد علي الطبقات المتعددة المتتالية لرفع قيمة معامل الاستغلال فالشكل 1-6

يبين الأطوار الثلاثة وفي الشكل 1- 8 يتحدد النقاط (a , b) علي محيط الدائرة بنصف قطر القلب المعدني بينها العزل بقطر R أكبر.

الشكل رقم 1- 8



في الكبلات الكهربائية ثلاثية القلب بالجراب غير الشبكي أو تلك غير أسطوانية المقطع حيث المجال غير متجانس تكون مركبة المجال المماسية أقل من تلك المحورية أي العمودية بما يقرب من عشرة مرات ولهذا لا بد من حماية الكبلات الكهربائية العاملة علي الضغط العالي بشبكة كهربائية فينتج المجال الكهربائي المحوري بقيمة كبيرة بينما في الجهود المنخفضة (التوزيع) نعتمد علي القدرة الميكانيكية والحرارية في التصميم، ومن ثم نجد من أن شدة المجال القصوى E_m بين وجهين تعتمد علي سمك العزل Δ وجهد التشغيل الخطي V_1 وقطر القلب المعدني r_o وذلك بالصيغة:

$$E_m = V_1 \left(\tfrac{1}{2}\Delta + \frac{0.18}{r_o} \right) \qquad (1\text{-}30)$$

تظهر أقصى شدة مجال عند النقطة a بالقيمة

$$E_{a,m} = V_1 \frac{\{(N+1)(N-1)\}^{1/2}}{\{2\, r_0\, ln\, [N+(N^2-1)^{1/2}]\}} \qquad (1-31)$$

تزيد قيمة شدة المجال القصوى في المعادلة هذه عن السابقة التقريبية خصوصا مع القلب البيضاوي (غير دائري) وكننا نعتمد عل معادلات الكبلات مفردة القلب للحصول علي المجال علي سطح القلب الخارجي لاتساع نصف القطر الخاص به ونحصل علي قيمته R_{seg} بالصورة:

$$E_a = \frac{V_{ph}}{[R_{seg}\ ln\{(R_{seg} + \Delta + \Delta_1)/ R_{seg}\}]} \qquad (1-32)$$

يمكن إهمال الجزء الصغير من السمك ونحصل علي القيمة مبسطة مثل:

$$E_m = \frac{V_{ph}}{[\, r_m\ \ln\{(r_m + 1.155\, \Delta)/ r_m\}]} \qquad (1-33)$$

تستخدم المعادلات هذه عند حساب جهد التصميم للكبلات ذات الجهد المنخفض حيث المجال الكهربائي غير القطري وبالتالي تكون شدة المجال في النقطتين (m,n) وبقطر انحناء ρ_A محددة طبقا للمعادلة:

$$E_{m,n} = \frac{V_{ph}}{[\, r\ ln\{(r + \Delta)/ r\}]} \qquad (1-34)$$

لذلك نتجه إلي عمل شبكة حماية كي نحدد المجال بصورة أسهل من المعادلة

$$E_A = \frac{V}{[\rho_A \; ln\{(\rho_A + \Delta_a)/\rho_A\}]} \quad (1\text{- }35)$$

أما إذا استطعنا إيجاد الشكل الدائري مع الحماية الشبكية هذه حول الكبل مع زيادة عدد الأسلاك الخارجية m للكبل لأكثر من 12 سلكا:

$$E_m = \frac{V \lambda \, ln\,(R/r_o)}{[\, r_o \, ln\,(R/r_o)\; ln(\lambda / m) + m \, ln\,(R/r_o)]} \quad (1\text{- }36)$$

وتتحدد قيمة المعامل λ من المعادلة:

$$\lambda = \frac{[1 + m \sin(\pi / m)]}{\sin(\pi / m)} \quad (1\text{- }37)$$

3-1 : تصميم العزل الكهربائي Design

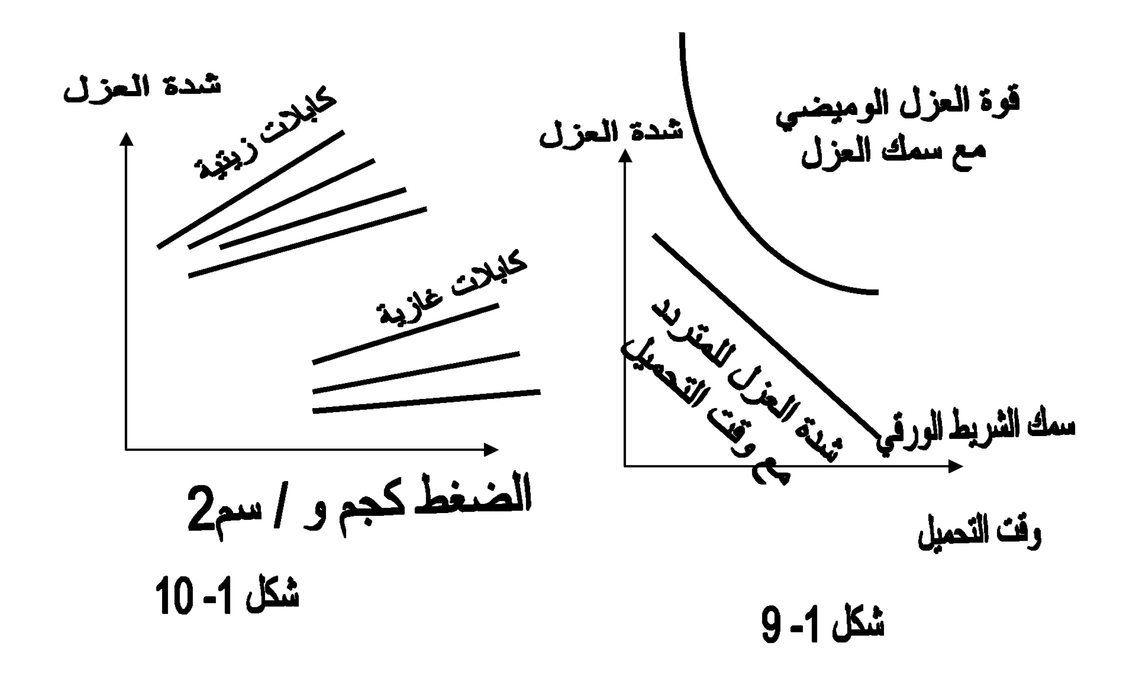
يتنوع انهيار العزل في الكبلات الكهربائية إلي ثلاث أنواع نتيجة التعقيد في عمليات الانهيار الكهربائي في المواد العازلة وتداخل الخصائص الكيميائية والطبيعية إضافة إلي تأير درجة الحرارة علي الوسط وأيضا الجهد الكهربائي المستخدم علي توزيع المجال غير المنتظم داخلها وهذه الأنواع هي:

1- الانهيار الكهربائي.
2- الانهيار الحراري.
3- الانهيار التآيني في الغازات المتواجدة داخل العزل الصلب.

كما يلزم التوضيح بأنه يتأثر بدرجة كبيرة الانهيار في العازل ذو الخواص الطبقية والرقائق العازلة laminated insulation مع تواجد الشحنات الزاحفة creep charges داخل الأشرطة الورقية

المشبعة بالزيت impregnated paper tapes وهو ما يسهل من ظهور النقاط الضعيفة داخل الوسط خصوصا مع الزيادة الطولية وهذه الأسس تخضع للقواعد الإحصائية لاختيار أقل قيمة مسببة انهيار العزل ويعطي الشكل رقم 1- 9 المنظر العام لتغير شدة المجال للعزل مع التأثير الزمني لتواجد الجهد علي العزل الكهربائي وتأثير سمكه وعمره الذي عادة يؤخذ له العمر الافتراضي (30 سنه).

أما عن تأثير نوعية العزل إذا كان الكبل ذو العزل الزيتي أو المملوء بالغاز فنجد أن العزل الزيتي يصمد أكثر عن تلك الكبلات الكهربائية الزيتية بالرغم من أن كلا النوعين يعتمد علي الضغط الخاص لنوع العزل ويوضح الشكل رقم 1- 10 العلاقة بين شدة العزل الكهربائي وضغط الزيت أو ضغط الغاز بالعزل وتعطيه هذه العلاقة في صورة رسم Chart يستخدم عند حساب جهد التصميم حيث يعتمد هذا التصميم الكهربائي علي تأثير كلا من المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي وأيضا تأثير الفقد الكهربائي في الجراب الواقي له وهو ما سوف نتعرض له في النقاط التالية.



أولا : جهد التصميم

نتبع القواعد التالية عند تصميم الكبل الكهربائي:

1- قوة تحمل العزل ذو الخصائص غير المتماثلة علي طول المسار.

2- مدة سريان التيار الكهربائي بصفة مستمرة دون انقطاع.

3- الجهود الانتقالية (الداخلية أو الخارجية) المحتملة والتي تعتمد علي مكونات الدائرة الكهربائية بذلك يتم اختير جهد التصميم لحالتي التشغيل واحتمالات انهيار العزل كهربائيا نتيجة الجهد الصناعي (50 – 60 هيرتز) معتمدا علي قيمة الجهد الخطي ولذلك يظهر معامل خاص بالنظم ثلاثية الطور تبعا للمعادلة:

$$V_1 = \frac{k_1 \; k_2 \; k_3 \; k_4 \; V_{rated}}{\sqrt{3}} \qquad (1-38)$$

جميع المعاملات بهذه المعادلة مجدولة بالجدول رقم 1-7 تبعا للحالات التطبيقية.

الجدول رقم 1-7: ثوابت التصميم لجهد التصميم لذبذبة التشغيل

معامل	اختصاص المعامل	القيمة التقريبية
k_1	يمثل أقصى زيادة ممكنة في جهد التشغيل المعتاد	1.15
k_2	الانخفاض المحتمل في شدة العزل بالتصميم عن القيمة الفعلية وتخضع للإحصائيات نتيجة ظهور الثغرات في العزل وهي 15-20 % بجانب التأثيرات الأخرى 10-25 %	1.5-1.25
k_3	يعطي تأثير الجهود الزائدة الداخلية والتي تصل 310 % لجهد 110 ك. ف. و 225 % لجهد 500 ك. ف.	2.5-2.25
k_4	يمثل انخفاض ضغط الزيت في الكبل الزيتي أو ضغط الغاز في الكبلات الغازية (كفاءة العزل)	1.2-1.1

يمكن تبسيط هذه المعادلة بدمج الثوابت معا ويتراوح قيمته من 3 إلي 5 مع العازل الجيد وإضافة الوقاية المناسبة.

الجدول رقم 1-8: جهد اختبارات الكبلات (ك. ف.)

جهد مقنن	جهد تشغيل أقصى	جهد اختبار أدنى	جهد اختبار عادي	جهد اختبار مقصر
33	36	154	170	-
110	123	420	550	450
132	145	500	650	550
150	170	560	750	650
220	245	820	1050	900
380	420	1360	1550	1425

أما جهد التصميم لاحتمال ارتفاع الجهد بناء الموجات النبضية وتأثيره علي تقليل قدرة العزل يكون عمليا في حدود 1.3 – 1.1 بينما جهد الاختبار يتبع الجدول 1-8 حيث القيمة الدنيا تشير إلي استخدام الكبلات غير المتصلة مباشرة مع الخطوط الكهربائية الهوائية حيث لا تتواجد الموجات المسافرة المرتدة والمسببة للجهود الكهربائية الزائدة بينما القيمة المقصرة reduced تعني القيمة المطلوبة للكبلات ذات التأريض لنقطة التعادل وتلك المتصلة مع الخطوط الهوائية التي تستقبل هذه الموجات ونشير إلي الضرر البالغ لتكرار الاختبار النبضي ولهذا يجب ترشيد هذا النوع من الاختبارات.

نستخدم عادة مادة من طبقتين من العزل المتدرج في شدة عزله في كبلات الجهد العالي والتي دائما تكون مدعمة screened حول القلب المعدني والعزل كطبقة خارجية من الجراب sheath المؤرض لمعادلة توزيع الجهد علي العزل الكهربائي وتقليل تأثير المعدن علي عمر العزل لأن جودة التركيب تقلل من ظهور الثغرات الهوائية وهي دائما السبب الرئيسي في انهيار العزل أو ضعفه علي الأقل حيث شدة المجال تتناقص بزيادة القطر مما يفيد زيادة سمك العزل تدريجيا في كل طبقة عن سابقتها مع الحفاظ علي معامل الأمان safety factor ثابتا فيقل بذلك عدد الشرائط الورقية فترفع جودة العزل insulation wrapping وبهذا نحسب سمك العزل تبعا للصيغة:

$$N = \frac{R}{r_0} = k\, f\, e^{([V/ r_0 E_1 \varpi - \ln f k] / k)} \qquad (1\text{-}39)$$

يتم حساب جهدي التصميم ومن ثم نختار السمك الأكبر فمثلا لحساب عزل الكبل 220 ك. ف. الزيتي بضغط 15 جوي فإذا كان قطر القلب 24.4 مم نختار معاملات التصميم تبعا لنوعية الورق العازل وسمكه والمجدول بعضه في الجدول رقم 1-9 حيث نختار ثلاث بسمك 0.075 ، 0.125 ، 0.175 مم ومن الرسم الخاص Chart للوصول إلي شدة العزل الكهربائي بعد مدة تشغيل ومثيله من الجهد الوميضي.

الجدول رقم 1-9 : أنواع العزل الكهربائي وخصائصه

رقم الطبقة	سمك الورق ، مم	كثافة الورق ، جم/سم^3	سماحية	جهد كسر، ك. ف. /مم	شدة مجال نبضي، ك. ف./مم	نسبة المجالين لجهد التشغيل E_2/E_1	نسبة مجال / الجهد النبضي	نسبة السماحية $\varepsilon_2/\varepsilon_1$
1	0.075	1.2-1.1	4.3	50	100	-	-	-
2	0.125	0.9-0.85	3.5	47	90	1.064	1.11	1.23
3	0.175	0.9-0.85	3.5	46	86	-	-	1.23

ومن ثم نحصل علي الصورة الرياضية لقيمة المعامل N_1 لجهد ذبذبة التشغيل:

$$N_1 = \frac{R}{r_o} k f_1 e^{([V_1 / r_o E_1 \omega - \ln f_1 k] / k)} \qquad (1\text{- }40)$$

ثم نحصل علي القيمة ذاتها N_1 للمعامل الأول:

$$N_1 = 1.23\ (1.064)\ e^{([508/12.2\ (50) - \ln 1.23\ (1.064)] / 1.23)} = 2.07 \qquad (1\text{- }40')$$

بينما المعامل الثاني الخاص بالجهد النبضي يصبح

$$N_2 = 1.23\ (1.11)\ e^{([1.08/12.2\ (100)\ -\ \mathit{ln}\ 1.23\ (1.11)]\ /\ 1.23)} = 2.18 \qquad (1\text{-}\ 41)$$

وبهذا يكون جهد التصميم للذبذبة هو

$$V_1 = 4\ \ (220)\ /\ \sqrt{3} = 508\ kV \qquad (1\text{-}\ 42)$$

بينما جهد التصميم للنبضي V_2 يكون

$$V_2 = 900\ (1.2) = 1080\ kV$$

في النهاية من هذه النتائج علينا أن نختار القيمة الأكبر للمعاملات وهي N_2 والذي ينتج عنه سمك العزل المطلوب بينما يتم الاختيار لحالات الجهد المنخفض والتوزيع بناء علي قيمة الجهد للذبذبة وباستكمال المثال نحصل علي نصف القطر بقيمة ($R_2 = 2.18\ (12.2) = 26.6\ mm$) وسمك العزل بقيمة ($R_2 - r_o = 14.4\ mm$) ويكون نصف القطر الأول هو$r_1 = 1.11\ (1.23)\ 12.2 = 16.6\ mm$ ويتم التفاضل بين الأنواع المختلفة لتحديد الأنسب مع أقل سماحية 0.125 كطبقة أولى ويكون السمك 0.075 فيصل السمك إلي $r_1 - r_o = 4.4\ mm$ والفاصل بين الطبقتين يحسب بنفس الأسلوب مع اعتبار f للطبقة الثالثة وبقيمة ($f = 100/86 = 1.162$) ثم ($r_2 = 1.162\ (1.23)\ 12.2 = 17.4\ mm$). مادام التصميم يتم علي الجهد النبضي وبعد تحديد السمك يجب عدم الخروج عن قيمة الجهد 508 ك. ف. كما يلي:

عند الجهد النبضي 1080 ك. ف. يكون شدتي المجال علي الطبقيتين هما 100 ، 90 ك. ف. / مم ولجهد الذبذبة 5.8 ك. ف. تكون النسبة بين الجهدين 2.12، ومن ثم لا حاجة لإعادة الحساب بل يمكن أخذها كنسبة من الحسابات السابقة فتكون للطبقة الأولي 47.1 والثانية 42.5 ك. ف. حيث لم تصل القيمة إلي جهد التصميم لأي من الطبقات. أما إذا خرجت القيمة لزم التعديل وإعادة الحساب مرة أخرى وتكرار نفس الطريقة، كما تتبع أيضا نفس طريقة الحساب مع الكبلات الغازية.

بالنسبة للكبلات الكهربائية الورقية المغمورة بالزيت tough impregnated cables فيكون اختيار شدة الجهد طويل المدى بقيمة 12 ك. ف. / مم ومعامل أمان 3.5 – 4 ، مع كبلات التوزيع 6 – 10 ك. ف. بالقلب المقسم segmental core cables يظهر المجال غير القطري ويكون جهد التصميم أقل عن سابقه مع ضرورة التأكد من أقصى شدة مجال. أما بالنسبة للكبلات الكهربائية المعزولة بالبلاستيك فإنها لا تعتمد علي قطر القلب المعدني وبهذا يؤخذ جهد التصميم علي أساس شدة المجال المتوسط وليس الأقصى وهو يتراوح بين 1.8 حتى 2.5 ك. ف. ظ مم ويزيد معامل الأمان لها وخصوصا الميكانيكي إذا كانت كبلات في جهد التوزيع ومن الهام طلاء القلب المعدني بطبقة رقيقة من البولي اثيلين (شبه موصل) قبل العزل ويوضع عليه حماية screen وغيرها عند اللزوم.

ثانيا: المجال المغناطيسي

بمجرد مرور التيار في الكبل يتولد مجال مغناطيسي حوله فيؤثر في:

1- زيادة مقاومة القلب المعدني نتيجة لكل من:

(أ) تأثير السطح surface حيث يزيد تأثره مع الأقطار الكبيرة ومع الذبذبة العالية.
(ب) تأثير التجاور proximity ويظهر لتقارب الكبلات العاملة تحت جهد من بعضها سواء كانت أحادية أو ثلاثية القلب وتأثيرها يجب أن يدخل في الحسابات الخاصة بتصميم الكبلات.

نتيجة لذلك يتم التعبير عن نسبة المقاومة رياضيا بالصيغة:

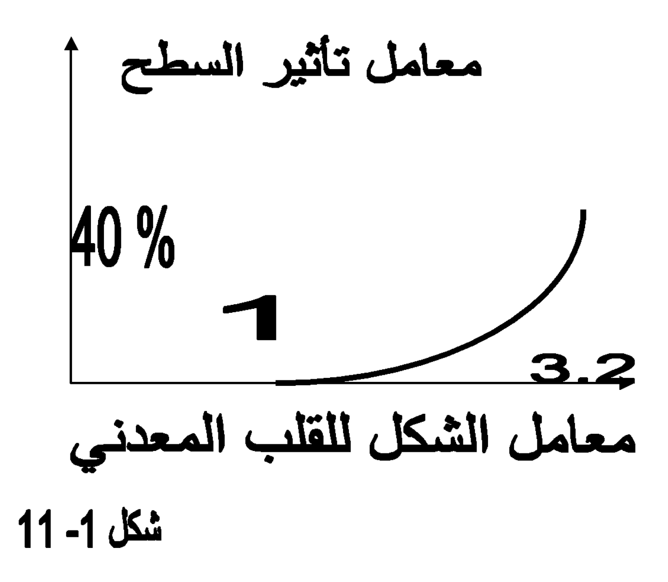
$$\text{نسبة المقاومة} = \frac{\text{(مقاومة القلب متردد)}}{\text{مقاومة القلب (تيار مستمر)}} \qquad (43\text{-}1)$$

وبالتالي تكون في الشكل

$$\text{نسبة المقاومة} = 1 + \text{معامل تأثير السطح} + \text{معامل تأثير التجاور} \qquad (43''\text{-}1)$$

ويمكن من الشكل رقم 1- 11 الحصول علي معامل تماثل شكل القلب X كدالة في الذبذبة f والمعامل الخاص بالتماثل للقلب k ويساوي الوحدة للقلب الدائري ويوضح ذلك العلاقة بين معامل المقطع المعدني وتأثير السطح علي المجال الكهربي كما نجد معامل التماثل رياضيا بالصيغة:

$$x = 0.159\ (10)^{-2} \sqrt{(f\ k / R_{DC})} \qquad (1\text{-}44)$$



شكل 1- 11

بينما معامل التجاورy يعتمد علي معامل السطح $y_{(surface)}$ وقطر القلب d_o والمسافة المركزية بين كل قلبين متجاورين S ويأخذ الشكل:

$$y = \frac{\{1.18\ y_{(surface)} / (0.27 + y_{(surface)}\}}{\{d_o / S\}^2} \qquad (1\text{-}45)$$

3- النسبة بين المقاومتين تتأثر بمقطع القلب وهو مؤثر ويمكن التغلب علي هذه الظاهرة بتقسيم المقاطع الكبيرة إلي أجزاء صغيرة معزولة عن بعضها (طلاء طل شعيرة بطبقة عزل رقيقة السمك) فينخفض المعامل k إلي 0.37 – 0.5 أما الكبلات الكهربائية داخل المواسير الصلبة

يرتفع لها مجموع المعاملين بنسبة 70 – 100 % لزيادة المجال المغناطيسي نتيجة ظهور الماسورة الصلب . فمثلا لحساب مقاومة التيار المتردد لكبل 550 مم^2 وقطر قلبه 41 مم ومسافة مركزية بين كل قلبين متجاورين بقيمة 205 مم ند درجة حرارة القلب 70° م فنجد مقاومة التيار المستمر R_{dc}:

$$R_{dc} = 1.015\ \rho_{20} \frac{\{1 + 0.004\ (70-20)\}}{Q} = \frac{1.015\ (0.182)\ (1+0.2)}{550} = 40.3\ \mu\Omega\ /m$$

حيث المعامل 1.015 يتضمن زيادة المقاومة نتيجة العصر الميكانيكي للقلب twisted core ومن ثم نحصل علي

$$x_{(surface)} = 0.159\ (10)^{-2} \sqrt{(f\ k / R_{DC})} = 0.159\ (10)^{-2} \sqrt{[50.1 / 40.3\ (10)^{-6}]} = 1.77$$

وبالنسبة للتجاور نحصل علي

$$x_{(proximity)} = 0.159\ (10)^{-2} \sqrt{[50(0.8) / 40.3\ (10)^{-6}]} = 1.6$$

بالاستعانة بالمنحنيات الخاصة بتأثير السطح نجد القيمة المرادفة 0.04 وبهذا نجد معامل تأثير التجاور بالقيمة

$$y_{(proximity)} = \{[\ 1.18\ (0.03)]/[0.03+0.27]\}\{41/205\}^2 = 0.0047$$

ومقاومة التيار المتردد تكون

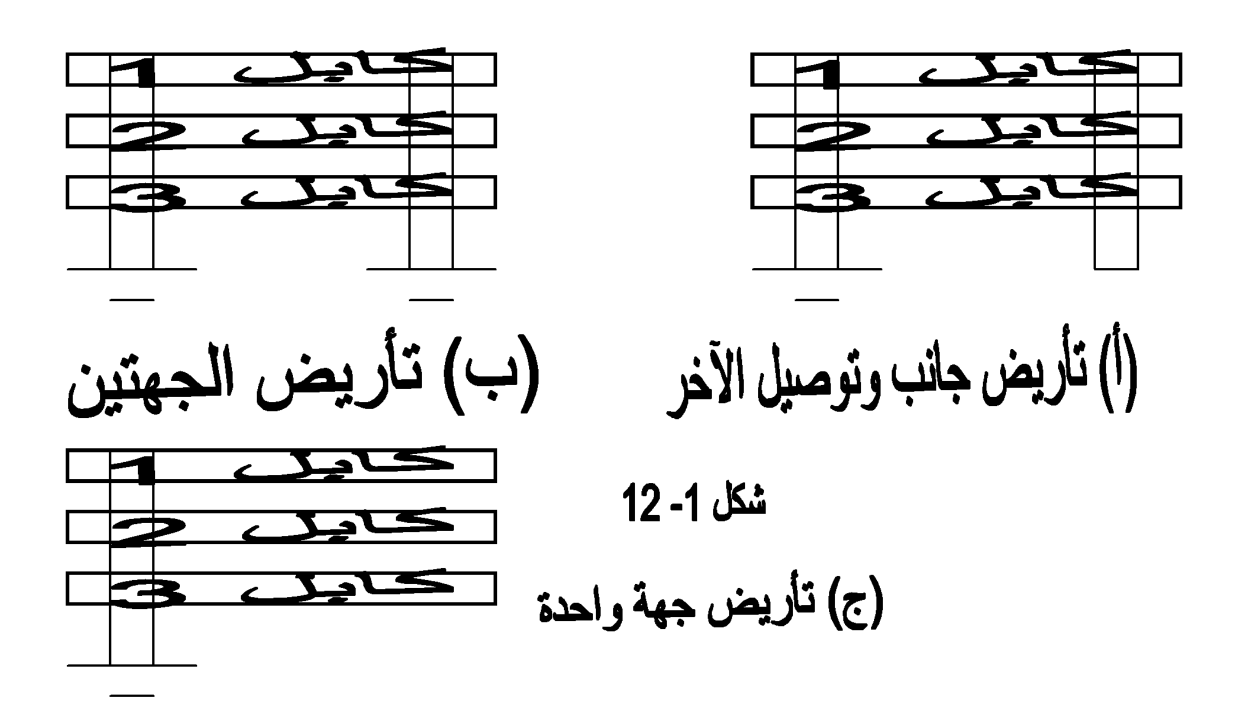
$$R_{ac} = 1 + y_{(surface)} + y_{(proximity)} = 40.3\ (10)^{-6}\ (1+ 0.04 + 0.0047) = 42.1\ \mu\Omega\ /m$$

وتصبح النسبة

$$Ratio = 42.1 / 40.3 = 1.045$$

ثالثا: الفقد في الجراب

الفقد في الطاقة الكهربائية والمتواجد بالجراب كما يظهر من الشكل رقم 1- 12 أسلوب التأريض الذي جاء في التحليل الرياضي كي يوضح الفرق بين حالات التأريض المختلفة، كما يقدم الشكل رقم 1- 13 الشكل التخطيطي لتأثير خطوط المجال الكهرومغناطيسي لكبل مفرد وحيد القلب يحمل التيار الكهربائي علي آخر مجاور له ويقع في نطاق المجال المغناطيسي أو إذا ما كان الكبلين بهما تيارين فسوف يتداخل المجالان معا ويتأثر كل كبل بالآخر.



(أ) تأريض جانب وتوصيل الآخر

(ب) تأريض الجهتين

(ج) تأريض جهة واحدة

شكل 1- 12

نستطيع النظر إلي الشكل الكهربائي المكافئ للكبل نسبة إلي القلب وتواجد الجراب حوله كما لو كان ملفا ابتدائيا لمحول هوائي العزل والجراب كملف ثانوي خصوصا وأن الجراب معدني (رصاص أو ألومنيوم) وتظهر احتمالات ثلاثة كما في الشكل 1 - 12:

<u>الحالة الأولى</u>: توصيل الأجربة معا من ناحية واحدة وتأريضها من نفس المكان (الشكل ج)

تتناسب القوة الدافعة الكهربائية مع طول الكبل بمعدل 50 – 200 ك. ف. / كم حيث القيمة الأكبر تعبر عن القصر والتيارات العالية وهو غير مرغوب ولذلك يكون هذا التوصيل بحالة حرجة ولا يوصى بالاعتماد عليه.

<u>الحالة الثانية</u>: توصيل الأجربة من النهايتين وتأريضهما (الشكل ب)

يمر التيار الكهربائي في الجراب بما يقرب من 20 – 80 % من قيمة تيار القلب الأصلي ويكون جهد الجراب صفريا لأن القوة الدافعة الكهربائية لوحدة الطول تساوي الفرق في الجهد نتيجة مرور التيار بالجراب.

<u>الحالة الثالثة</u>: تشبه الثانية م زيادة إمكانية ظهور القوة الدافعة في الجهة غير المؤرضة

بفرض كبلين (مفرد القلب) متجاورين (الشكل رقم 1- 13) وبسماحية مغناطيسية في الفراغ μ_o يظهر المجال المغناطيسي حول الكبل به تيار I بشدة مجال H أ/م بكثافة مجال B بوحدة ف ث/م^2 وهما:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$B = \frac{I\mu_o}{2\pi r} \qquad (1\text{-}46)$$

يتناسب المجال Ψ مع قوة الدفع الكهربائي في الجراب بالكبل الآخر بعدا وقربا من الأول (حامل التيار) والفيض المغناطيسي في الوسط غير المخلخل بسماحية μ (تساوي الوحدة للمواد غير المغناطيسية) يظهر بالمعادلة التكاملية:

$$\Psi = I\,[\mu\,\mu_o / 2\pi] \int dr/r = I\,[\mu\,\mu_o / 2\pi]\;\ln (S/R) \qquad (1\text{-}47)$$

المعامل الحثي M بين القلب المعدني حامل التيار والجراب المعدني للكبل الآخر يتحدد من

$$M = \frac{\Psi}{I} = [\mu \mu_o / 2 \pi] \quad ln\ (S/R) \qquad (1\text{-}48)$$

ويتولد جهد بالكبل الكهربائي الثاني نتيجة تيار الكبل الأول بقيمة

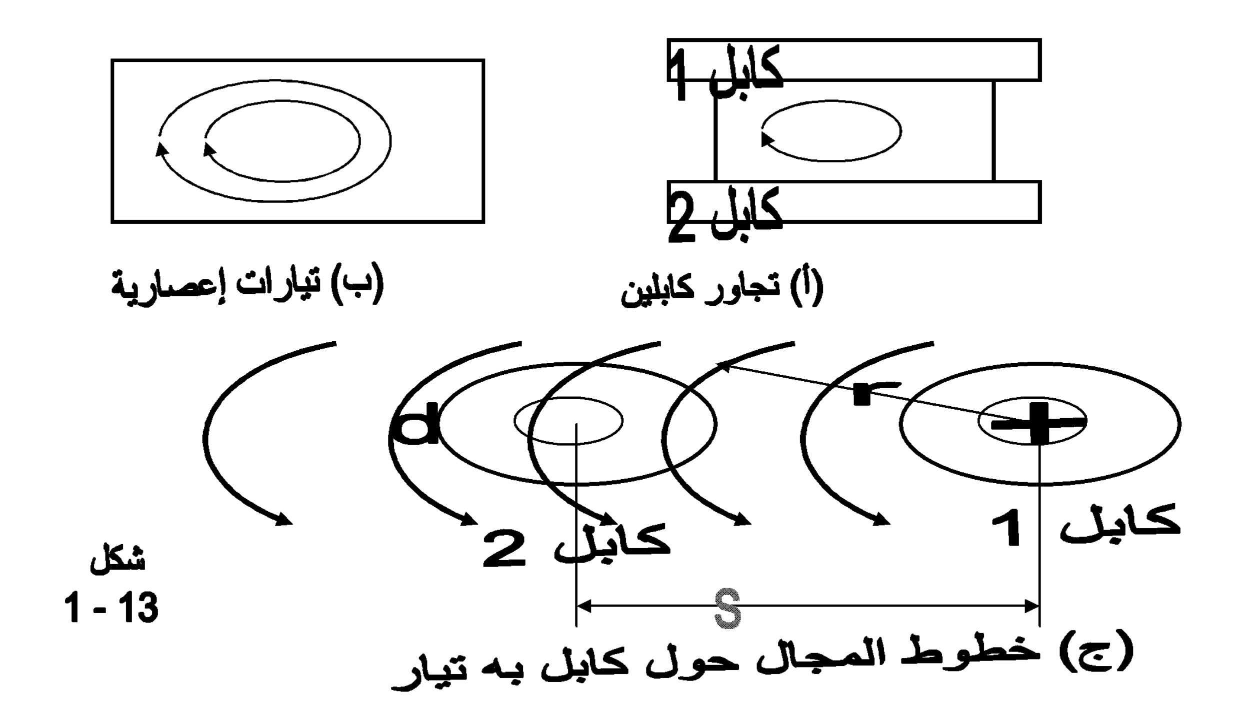
$$E_2 = j \omega M I \qquad (1\text{-}49)$$

بينما الجهد المتولد بالكبل الثاني نتيجة التيار الأصلي به وتيار الجراب المار به يكون

$$E_{2o} = j \omega M (I + I_{1o}) \qquad (1\text{-}50)$$

وبالتالي تكون محصلة الجهد المتولد نتيجة التيارات في الكبلين هي

$$E = 2 j \omega M (I + I_{1o}) \qquad (1\text{-}51)$$



وهو نفس الجهد E المساوي لفرق الجهد بين الجرابين نتيجة مرور التيار في مقاومة الجراب تبعا للصيغة:

$$E = 2\ R_{sh}\ I_{1o} \qquad (1\text{-}52)$$

ويكون التيار المتولد في جراب الكبل الأول بقيمة عددية هي

$$|\ I_{1o}| = \frac{j\ \omega\ M\ I}{\sqrt{\{\ (R_{sh})^2\ +\omega^2\ \ M^2\}}} \qquad (1\text{-}53)$$

وتتحدد النسبة بين الفقد في الجراب إلي الفقد بالقلب المعدني في الصورة

$$y_{sh} = \frac{I_1^2 R_{sh}}{I^2 R_{dc}} = \left[\frac{\omega^2 \; M^2}{R_{sh}^2 + \omega^2 M^2} \right]\left[\frac{R_{sh}}{R_{dc}} \right] = m^2 \left[\frac{R_{sh}}{R_{ac}} \right] \qquad (1\text{-}54)$$

كما يمكننا التوصل إلي صيغة مماثلة بالنسبة للفقد في الجراب بالنسبة للكبلات الكهربائية ثلاثية القلب مع تغير شكل القلب بينما تسري هذه الصيغة للحالة التماثلية فقط، أما قيمة النسبة بين الفقد في الجراب إلي القلب في الكبلات الكهربائية أحادية القلب ثلاثية الطور فنعبر عنها بالنسبة للكبل الأوسط في الموقع بالصيغة:

$$(m_2)^2 = \frac{(I_{II})^2}{I^2} = \frac{1}{(Q^2 + 1)} \qquad (1\text{-}55)$$

وللكبلين الخارجيين نتبع المعادلة

$$(m_{1,3})^2 = \frac{(I_I , I_{III})^2}{I^2} = \frac{P^2 + 3\,Q^2 + 2\,\sqrt{}\,[3\,(P- Q) + 4]}{4\,(P^2 + 1)(Q^2 + 1)} \qquad (1\text{-}56)$$

كل المعاملات التي ظهرت في المعادلة السابقة تتحدد بالقيم

$$P = \frac{R_{sh}}{(x+a)}$$

$$Q = \frac{R_{sh}}{[x - (a/3)]}$$

$$X = 2\,\omega\, ln\, S/R \qquad (10)^{-4}\ \Omega/km$$

$$a = 2\,\omega\, ln\, 2 \qquad (10)^{-4}\ \Omega/km$$

أما الجراب الموحد للكبلات الكهربائية ثلاثية القلب يقوم التأثير المتبادل بين الأوجه بتعويض الفرق ويقلل من التيارات الإعصارية في الجراب إلي الحد الذي يسمح بإهماله. إضافة إلي أن تسليح الكبلات ferromagnetic armor يساعد علي زيادة الفيض المغناطيسي بين الكبلات الكهربائية أحادية القلب ويؤدي إلي رفع قيمة الحث المتبادل بين القطب والجراب ويكون الفقد أكبر خصوصا وأن السماحية تتراوح بين 300 و 500. ولهذا لا نوصي باستخدام التسليح الصلب للكبلات الكهربائية أحادية القطب، ويمكن التغلب علي ذلك باستخدام الأسلاك دائرية المقطع حيث نحتاج إلي قوة أكبر لعبور نقاط التلاحم بينها من جراء المقاومة المقابلة إضافة إلي ضرورة جلفنة هذه الأسلاك كي يخفض الفقد. كما أن التبادل المتتالي للأسلاك الحديدية مع النحاسية علي طول مسار الكبل بصفة منتظمة يقلل من الفقد وبهذا تكون نسبة الفقد مع الكبلات الماسورية من النوع المغناطيسي التعامدي diamagnetic pipe للكبلات الكهربائية أحادية القطب منسوبة إلي ثلاثية القطب عند التيار المستمر محددة بالمعادلة:

$$y_{pipe} = \frac{P_{pipe}}{P_c} = \frac{2.06\ D_{av}\ \ q\ \ t\ \ M\ (10)^{-9}}{(\rho_{pipe}\ \ \rho_c)} \qquad (1\text{-}57)$$

حيث نجد أن هذه النسبة تعتمد علي مقطع القطب المعدني q (مم) والقطر المتوسط للماسورة D_{av} والسمك t إضافة إلي المقاومة النوعية سواء للقلب ρ_c أو الماسورة ρ_{pipe} بوحدات (أوم مم2/م)، أما للماسورة المغناطيسية بقطر داخلي D_{int} تكون النسبة هي

$$y_{pipe} = \frac{2.95\ D_{int}\ \ q\ M\ (10)^{-9}}{(\rho_{pipe}\ \ \rho_c)} \qquad (1\text{-}58)$$

يتضح أن الحث المتبادل يتمد علي النسبة بين البعد بين الكبلات الكهربائية المتجاورة وقطر الماسورة (1.36 – 1.51)، كما يجب إضافة الفقد في طبقة التسليح في الكبلات الكهربائية مفردة القطب مع وضع الفروض اللازمة لتبسيط الحل فمثلا لثلاث كبلات أحادية القطب متجاورة علي شكل مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه 180 مم وقطر الجراب 60 مم وسمكه 2.5 مم والمقطع النحاسي 550

مم2 والمقاومة النوعية 42.1 ميكرو أوم /م (عند 60 ° م تكون 49). ومن ثم نحصل علي مقاومة الجراب الرصاصي بالقيمة:

$$R_{sh} = \frac{\rho_{sh}}{\Delta\pi\ D} = \frac{0.21}{2.5\ 2\pi\ \ 60} = 0.455\ m\Omega/m \qquad (1\text{-}59)$$

والحث المتبادل بقيمة

$$M = \frac{\mu_o}{2\pi}\ ln\ (2S/D|) = \frac{4\ (10)^{-7}}{2\pi}\ ln\ (360/60) = 0.358\ \ \mu H/m$$

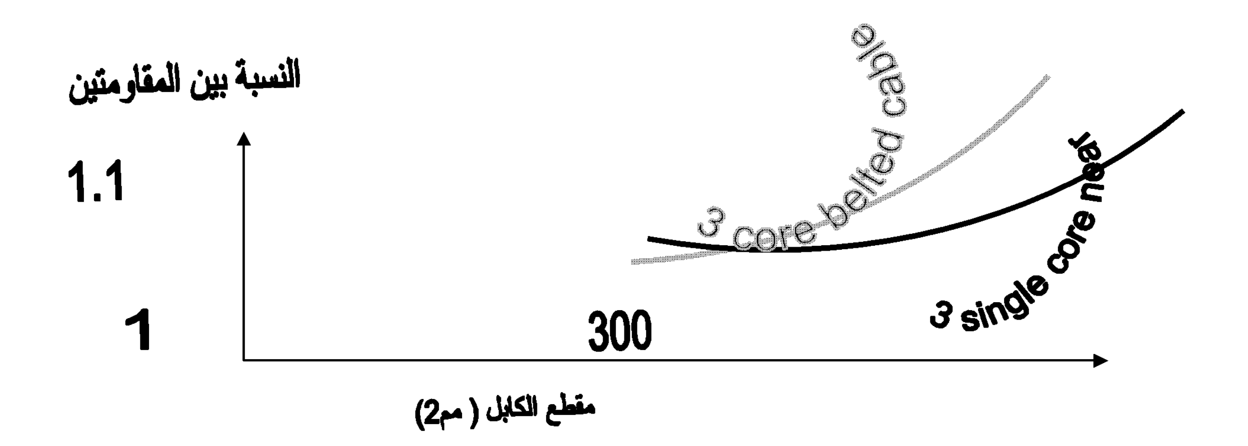
ونسبة الفقد تتحدد بالمعادلة

$$y_{sh} = [\ \frac{\omega^2\ \ M^2}{(R_{sh})^{\ 2}\ \ +\omega^2\ \ M^2}\ ][\ \frac{R_{sh}}{R_{dc}}\ ]=0.58 \qquad (1\text{-}60)$$

أي أن الفقد في الجراب يصل إلي 85 % من قيمة الفقد في القلب النحاسي مما يدعونا للاهتمام بهذا الفقد لتعاظمه، ويبين الشكل 1- 14 تأثير النسبة بين المقاومتين لحالتي الثلاث كبلات منفصلة والكبل ثلاثي القلب ومدى تأثير مقطع القلب علي ذلك.

وأخيرا نجد ظهورا لقوة كهروديناميكية تؤثر علي الكبل وأجزائه وهي قيمة صغيرة للتيار العادي ولكنها ترتفع بشدة مع تيارات القصر أو التيارات العالية جدا وتسبب اهتزازات ميكانيكية ولها صفات مدمرة علي عزل الكبل وتظهر هذه الحالات عند توصيل الكبلات الكهربائية علي قصر أو إعادة توصيلها في مستوي شبكات التوزيع الكهربائية علي قصر بعد الفصل الأول وتكرار ذلك يدمر الكبل وهو ما يتعرض له بالمثل المحولات في شبكات التوزيع عموما.

الشكل رقم 1- 14



الفصل الثاني

صيانة الكبلات
Cable Maintenance

أنه من المعروف أن العمل المستمر وتكلفته ترفع بشدة تكلفة الإنتاج وبالتبعية سعر السلعة المباعة وهذا تماما ما ينطبق علي الأعمال الكهربائية عموما وعلي أداء الشبكات الكهربائية خصوصا، وهكذا عندما نتعرض للعمل المستمر اليومي أو غيره (الدوري) والذي تحتاجة الحالات المختلفة لضمان إستمرارية العمل علي أحسن وجه (أعلي كفاءة) وبأقل تكلفة فعلية نكون قد وضعنا حجر الأساس لأداء العمل الهندسي في هذا المجال. عند التداخل مع الضرورة الملحة نحو تطوير منظومة الأداء في الأعمال التنفيذية داخل عمل الشبكات الكهربائية وخصوصا داخل المدن والقري يجب علينا التعرض إلي أهم الضروريات التي عادة ما نحتاجها، ألا وهي أعمال الصيانة والتركيبات والإختبارات بجانب تلك الظاهرة الأساسية لمواكبة التطور التقني مثل موضوع الإحلال والتبديل وكذلك التعديل.

من هذا المنطلق نجد أن الأعمال الجارية الدورية اليومية أو الشهرية وحتي تلك السنوية فكلها يمكن أن تندرج تحت عنوان أعمال الصيانة وبهذا نتوجه بموضوع هذا الكتيب إلي الأعمال الجارية الدورية بشأن الكبلات الكهربائية. من الناحية الأخري إن هذا الموضوع ينطبق جذريا علي جميع الأعمال الهندسية بكافة تخصصاتها وليس المجال الكهربائي فقط بل ومن داخل المجال الكهربائي نتناول جزءا صغيرا منه في هذا الفصل كي تكون الأمور بسيطة للمهندس القارئ علي الرغم من لأن هذا الوضع لا تتناوله الدراسة في كل كليات الهندسة.

تشمل أعمال صيانة الكبلات الكهربائية العديد من الأعمال مثل تصنيع بعض الأجزاء أو تخزين قطع الغيار أو ذات الكبلات أو عمليات التركيب والنقل والرفع والجر والشحن ولذلك يتضح أن جميع أعمال الصيانة والاختبارات ما هي إلا أعمالا هندسية دقيقة تحتاج إلي الخبرة والدقة في الأداء والعمل الجاد من أجل الحفاظ علي سلامة هذه الكبلات الكهربائية ذات الأهمية الخاصة داخل الشبكة كمغذيات جوهرية في التوزيع سواء في الأبنية أو المنازل أو العمارات والمجمعات السكنية والنوادي والملاعب

الرياضية إلي غير ذلك من أعمال، وبهذا نكون في أمس الحاجة إلي التعرف علي مبادئ الصيانة في الكبلات الكهربائية وهو ما نفصله فيما يلي.

1-2: الأعمال الميكانيكية

تتنوع هذه الأعمال علي نطاق واسع وشامل ولذلك نبوبها علي النحو الوارد في السطور التالية.

أولا: تخزين الكبلات

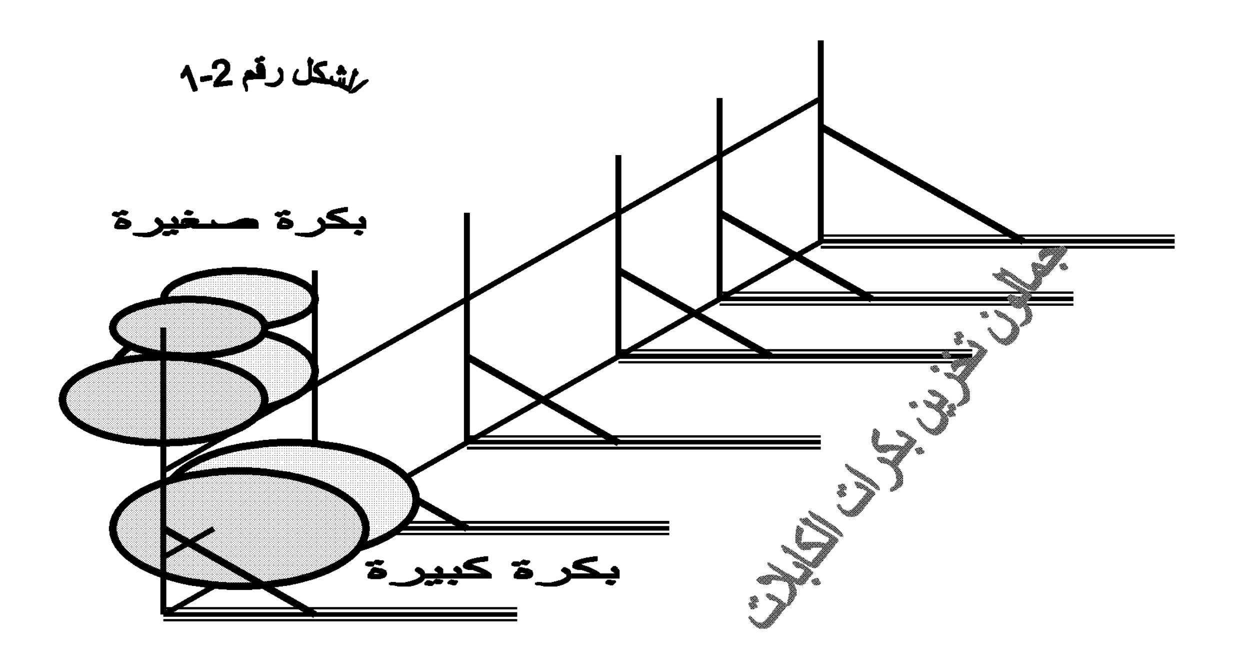
يعتبر تخزين الكبلات من عماد الأعمال الهندسية من أجل:

1- **حماية الكبلات من التلف.**
2- **وقاية الكبلات من الرطوبة.**
3- **عدم الإخلال بمنظومة الأداء وتعليمات المصنع.**
4- **الحفاظ علي مستوى العزل عاليا.**

من هذا المنطلق يجب الاهتمام بالكبلات الكهربائية من حيث المبدأ وذلك طبقا للمواصفات القياسية الخاصة بتخزين ونقل الكبلات الكهربائية وهي التي تنتج في مقاسات مقننة ومحددة منعا للتداخل وحرصا علي المصنعين من سرعة استبدال التالف منها وعلاجه عند الحاجة إليه ونجد أن الجدول رقم 1-2 يحصر بعضا من مقننات البكرات القياسية والتي يتم وضع الكبلات الكهربائية عليها سواء أثناء النقل أو الرمي (التركيب) لأن هذه البكرات هي الملاذ الهندسي السليم للقضاء علي أية تأثيرات ميكانيكية خارجية علي الكبلات.

جدير بالذكر أن هذه المقننات الواردة في الجدول السابق تحدد متطلبات الرفع بالأوناش المختلفة في كافة المواقع لكل من هذه البكرات سواء أثناء التخزين أو خلال عمليات النقل بالناقلات المختلفة أو الرفع بالأوناش المختصة المناسبة والتركيب بالمواقع المحددة لها وتبعا للأصول الفنية المستخدمة في هذا الميدان، ويبين الشكل رقم 2-1 المنظر العام لهيكل حديدي ثلاثي المستويات لتخزين الكبلات الكهربائية في مواقع التخزين حيث يتم ترتيبهم كما هو موضح بالشكل. من الشكل يبين لنا أن بكرات

الكبلات مصفوفة بجوار بعضهم البعض كما نلاحظ أن البكرات مغلفة بطبقة من الرقائق الخشبية حماية للكبلات من الخدش أو العصر أو الكدمات، وهي هذه التي تسبب في بعض الأحوال التلف الميكانيكي في الكبل وتؤثر علي كفاءة تشغيله.

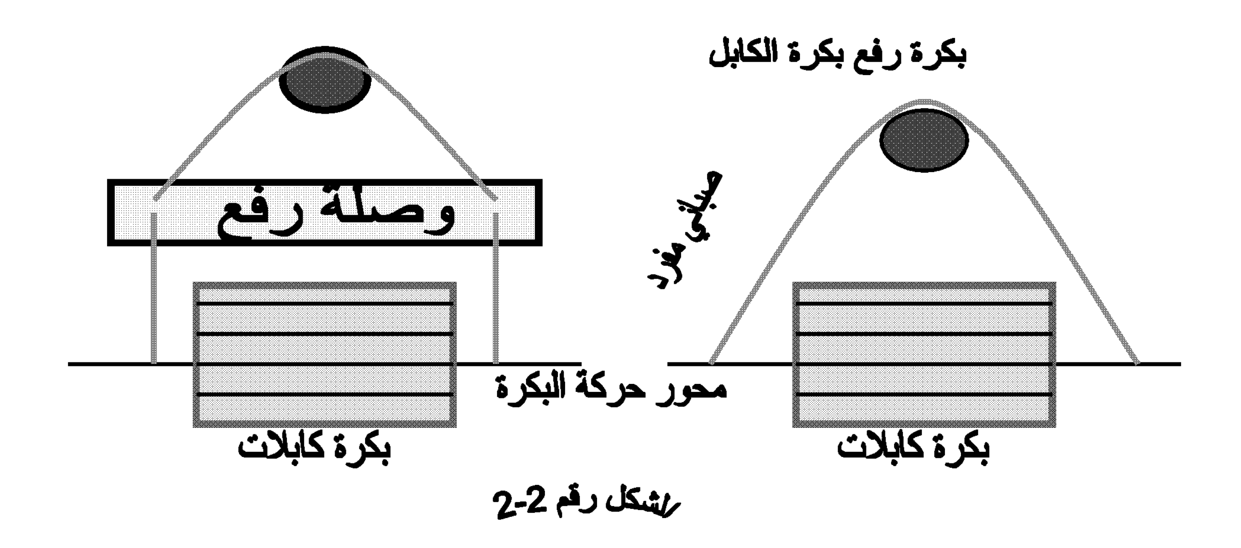


ثانيا: رفع البكرات

يتم وضع البكرات محملة بالكبلات كما نراها في الشكل رقم 2-2 حيث يعطي هذا الشكل بعض الأنواع المختلفة للتحميل وكيفية ربط البكرات ورفعها، وكذلك بعض الوسائل المتعددة للرفع من أجل رفع أو إنزال البكرة إلي أو من ناقلاتها أو أثناء رفعها لإجراء الرمي في الموقع. ويتم ذلك بناءا علي مقننات قياسية من استخدام أسلاك الصباني والحلقات ووصلات الربط أو التعليق كما هو مبين في الجدول رقم 2-2، وتتحدد حمولة الرفع في كل حالة حتى نستطيع اختيار الأوناش الملائمة تبعا للتنفيذ وموقعه والمعوقات التي قد تواجه العمل التنفيذي فنيا.

الجدول رقم 2-1: مقننات البكرات حاملة الكبلات (المسافات بالميليمتر)

كود البكرة	قطر البكرة	عرض البكرة	قطر تجويف محور البكرة	قطر عامود المحور	وزن عامود المحور	طول عامود المحور
4	400	276	5	30	3	500
5	500	306	35	30	3	500
6	600	326	35	30	3	500
8	800	476	50	45	10	800
10	1000	600	50	45	10	800
12	1200	600	70	65	26	1000
14	1400	820	70	65	26	1000
17	1700	890	80	75	49	1400
18	1800	1060	80	75	49	1400
20	2000	1180	100	75	49	1400
22	2200	1240	100	95	80	1450
25	2500	1560	130	110	150	2000
26	2600	1780	140	110	150	2000
30	3000	2160	180	140	308	2400



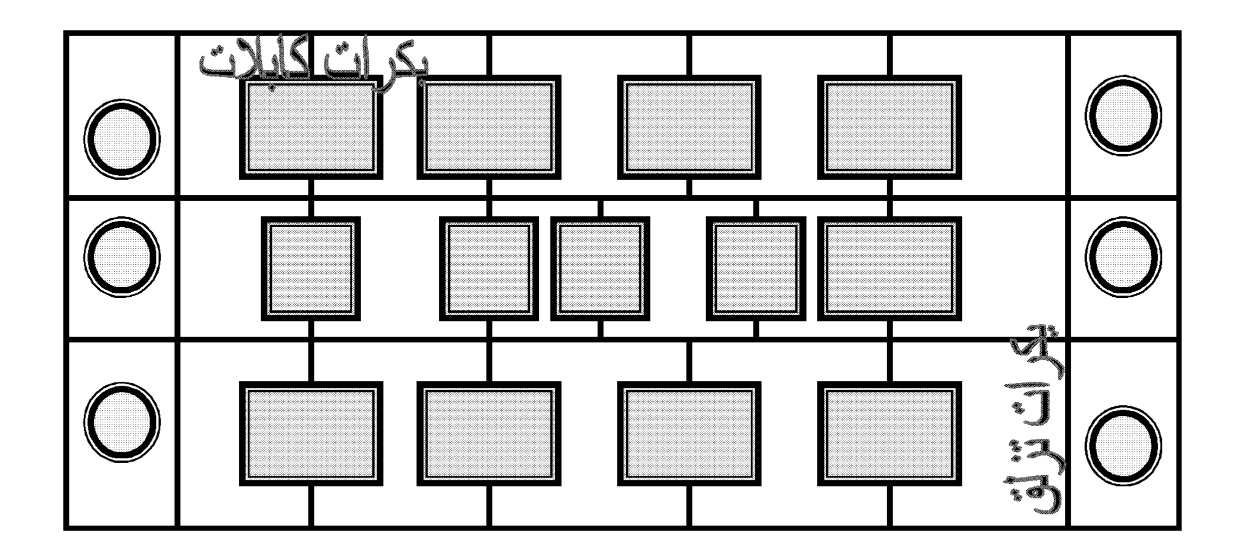
الشكل رقم 2-2

الجدول رقم 2-2: مقننات رافعات البكرات الخطافية

حمولة الرفع (طن)	طول (م)	قطر الصباني (مم)	المقبض (مم)	قطر الحلقة (مم)	الوزن (كجم)
10	2.85	22.5	57×70	48	65
5	1.5	18.5	50×62	42	34
1.5	1.4	9.3	10×30	20	10
0.5	0.9	5.3	10×20	12	3

ثالثا: تمديدات الكبلات

يجب أن يتم رمي الكبلات الكهربائية دون أي تحميل عالي علي الكبل ذاته أو علي مقطع العزل أو القلب المعدني نتيجة شد خاطئ. لذلك يتم ملئ بكرات الكبلات الكهربائية بالمقاسات المختلفة من خلال نظام حركي علي بكرات سهلة الدوران كما يوضحها الشكل رقم 2-3، حيث يستخدم نفس الأسلوب عند فرد الكبلات الكهربائية في مواقع العمل وتركيبها كي نحافظ علي كفاءة أداء الكبلات أثناء التشغيل في الشبكة الكهربائية.



/الشكل رقم 2-3

يبين الشكل أيضا أنه من الممكن استخدام مقاسات مختلفة من الكبلات الكهربائية متباينة المقننات في ذات مجموعة التجميع والأطوال المعطاة. من الجهة الأخري علي الرسم، تمثل أحد الهياكل المعدنية القياسية المستخدمة في هذا المجال للبكرات حتى الترقيم الكودي رقم 14 وتظهر بكرات الكبلات الكهربائية في مجموعات متخصصة لكل صف حتى لا يجهد الكبل ميكانيكيا. جديربالذكر أن الجدول رقم 2 - 3 يجدول الأوزان القياسية لمد الكبلات الكهربائية حيث يقدم النوع ثلاثي القلب من الكبلات الكهربائية سواء ذات القلب الألومونيوم أو ذلك من النحاس، وذلك لبعض الجهود المنخفضة وجميعها تتبع الجداول القياسية في هذا الصدد.

الجدول رقم 2 - 3: السماحية أثناء مد الكبلات الكهربائية تبعا للمواصفات

مقطع	الأوزان المسموحة (كجم)					
الكبل	جهد (ك. ف.)			القلب		
الثلاثي	1	6	10	نحاس	ضفائر ألومونيوم	ألومونيوم
240	750	950	1000	3600	2800	1400
185	650	750	850	2700	2200	1100
150	600	650	750	2200	1800	900
120	400	500	650	1800	1400	700
95	350	450	850	1400	1100	550
70	300	400	500	1050	840	400
50	230	350	450	750	600	600
35	189	300	400	500	400	400
25	170	280	380	350	300	300

رابعا: ماكينات الرفع والجر

تتنوع الماكينات المستخدمة سواء في جر الكبلات الكهربائية أو الأوناش اللازمة لرفع البكرات من حيث أسلوب عملها أو طريقة التعامل معها. ويقدم الجدول رقم 2 - 4 بعضا من البيانات الفنية لذات ماكينة السحب النمطية محددا لها قيمة الشد الأقصى كي نكون علي علم تام بمدى صلاحية الماكينة

المستخدمة لأداء العمل المنوط بالموقع، وقبل نقل المعدة حماية للمعدة وللكبل وتوفيرا للوقت سواء أثناء رمي الكبل أو ما يعبر عن زمن كلي مستهلك في أداء العمل.

الجدول رقم 2-4: بعض مقننات رمي الكبلات الكهربائية بأحد الماكينات المستخدمة

البيان	القيمة
سرعة رمي الكبلات (م/ق)	20
قطر الكبل (مم)	20 – 65
ارتفاع مجموعة الكبل (م)	حتى 350
قدرة السحب (ك.و.)	4.5
قوة الشد (كجم)	حتى 1000
الوزن الكلي (طن)	1.9

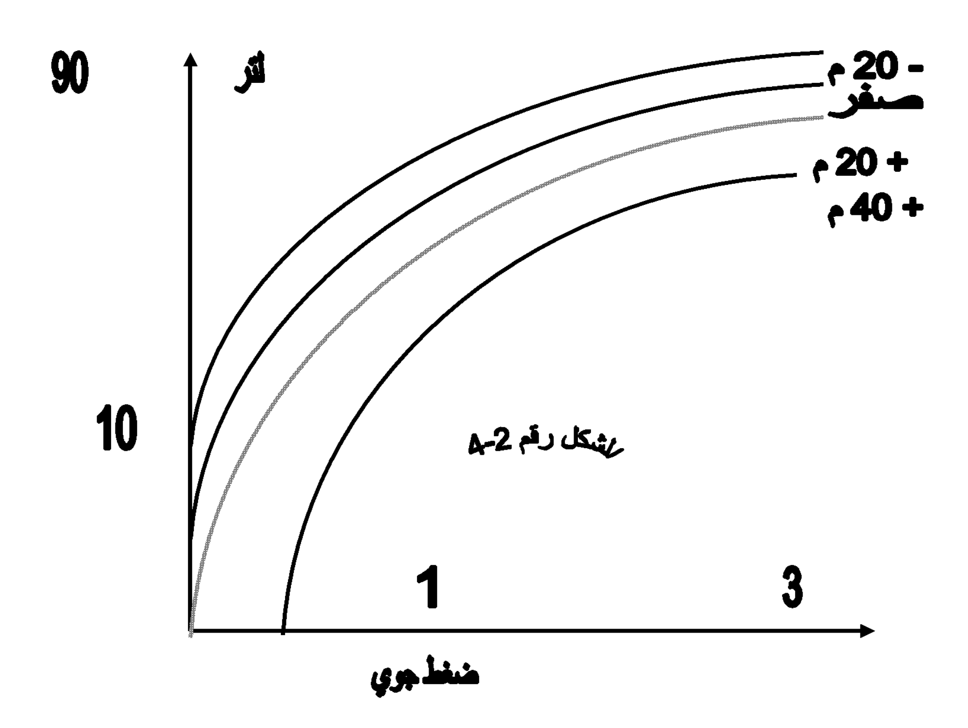
المحور الثاني: نوعيات الصيانة

يجب علينا المحافظة علي مستوى ضغط الزيت داخل الكبلات الكهربائية في حدود 0.3 كم/سم^2 كحد أدنى مع عدم ضخ كل الزيت من المغذي الزيتي، حتى لا يسمح بدخول الهواء إذا ما برد الزيت مما قد يتسبب في ظهور الفقاعات. هذه الفقاعات المتوالدة داخل العزل هي التي تؤثر بشكل حاد علي مستوى عزل الزيت داخل الكبل، ويمثل الشكل رقم 2 - 4 الإطار العام للعلاقة الهندسية بين حجم الزيت بالخزان والضغط.

من الناحية الأخري تستخدم دوائر ثانوية كهربائية تعمل بالتيار المستمر لإعطاء الإشارة الدورية عن حالة ضغط الزيت ومستواه علي طول مسار الكبل، وذلك حماية ومنع التلف عن العزل الكهربائي في الكبل. ويستقبل هذه الإشارات الدورية مهندس الوردية داخل محطة المحولات (أو التوليد) التي تتصل بهذا الكبل كما تتنوع أعمال الصيانة تبعا لحالة العطل ونعطي إيجازا لهذا العمل علي النحو التالي.

بالنسبة للكبلات الكهربائية غير الزيتية وهي المتداولة كمغذيات في الشبكات الكهربائية في مجال التوزيع الكهربائي فدائما كما هو شائع عمل وصلات للكبلات. فمثلا توجد وصلات لكبلات التيار الخفيف. وهي عبارة عن وصلات معزولة تماما

وغير قابلة للثني لأن هذه المنطقة ضعيفة من الناحية الميكانيكية، ولهذا تأخذ هذا الاهتمام حماية لها بجانب الوقاية الكهربائية اللازمة بتواجد العزل الكهربائي الضروري لهذه الوصلة.



شكل رقم 2-A

2-2: التصميم الحراري

درجة الحرارة ذات تأثير عالي علي العزل الكهربائي لأنها تتسبب في خفض كفاءة العزل وكذلك تأثيرها السلبي علي تحمل الأسلاك لمرور التيارات العالية وخصوصا مع الحرارة المرتفعة. ولذلك يجب اتباع المواصفات القياسية لتشغيل الكبلات حيث تحدد كل دولة هذه المواصفات تبعا للمناخ ودرجة الحرارة لديها (الجدول 2 - 5) كما أن التشغيل المستمر ينقص من قدرة العزل الكهربائي بخلاف التشغيل المتقطع.

الجدول رقم 2 - 5: درجات الحرارة المسموحة بصفة مستمرة تشغيل (° م)

نوع الكبل	جهد	التشغيل المستمر			أقل من 100 ساعة	
Type	ك. ف	روسيا	أمريكا	إنجلترا	روسيا	أمريكا
كبلات زيتية	35	80	80	85	90	90
	110	70	70	85	80	80
	220	65		80	75	
كبلات زيتية في مواسير صلب ذات ضغط	110	70	70		80	80
	220	65	70		75	80
	500	60			70	
كبلات غازية	35	80	80	85	90	90
	110		70	85		80
	220			85		

من الهام التنويه إلي أنه تتحدد درجات الحرارة أيضا بنوعية العزل المستخدم (الجدول رقم 2 - 6) كما أن درجة حرارة القلب المعدني T_c تتوقف علي الفقد في القلب المعدني P_c والمقاومة الحرارية لكلا من العزل S_{ins} والاستخدام S_s والفقد الكلي بالكبل ΣP_k ويعتمد بشكل مباشر علي درجة حرارة المحيط الخارجي T_o والتي تتباين مع اليوم وفصول السنة ودرجة التحميل النسبي وكذلك المقاومة الحرارية له S_o مع عدم احتساب الفقد في العزل كما نراها في التعبير الرياضي:

الجدول رقم 2 - 6: درجات الحرارة المسموح بها للتشغيل المستمر في كبلات التوزيع الكهربائي حتى 35 ك. ف (مْ)

نوعية العزل	مغمور وداف				بولي أثيلين	PVC	مطاط
جهد	حتى 3	6	10	30-20	35-1	10-1	10-1
درجة الحرارة	80	65	60	50	70-80	70	65

$$T_c = S_{ins} + \Sigma P_k (S_o + S_s) + T_o \qquad (2\text{-}1)$$

من هنا نحصل علي الفقد في القلب المعدني P_c وفي الجراب P_{sh} وفي العزل P_{ins} تبعا للمعامل الحراري للقلب α كما يلي :

$$P_c = \rho_c I^2/q = \rho_o \delta^2 q [1 + \alpha (T_c - 20)] = R I^2$$

$$P_{sh} = P_c y_{sh} \qquad (2\text{-}2)$$

$$P_{ins}=V^2\omega C \tan\delta = V^2 \omega \tan\delta \{2\pi \varepsilon\varepsilon_o/ln (R/r_o)\}$$

يظهر أيضا في محتوي الجدول 2-7 تأثير التربة الأرضية من حيث حالتها أو نوعيتها وهي من المعاملات الهامة عند التصميم وبالنسبة للكبلات الكهربائية أحادية القلب نحصل علي المقاومة الحرارية في الشكل:

الجدول رقم 2 - 7: المواصفات القياسية لمعاملات التربة الأرضية

الرطوبة	نسبة الرمل (%)	نسبة طمي (%)	القيمة الحرارية النسبية (ْم سم/وات)	السعة الحرارية (جول/جم ْم)	الكثافة (جم/سم2)
شديدة الرطوبة	9	14	80	2	2.8-2
متوسطة الرطوبة	9-7	14-12	120	0.33	1.9
منخفضة الرطوبة	7-4	12-8	180	0.83	1.8
جافة	4		240	0.8	1.43
خرسانية			90	0.33	2.2
أسفلتية			160	1.66	1

الجدول رقم 2-8: المقاومة النوعية للعزل الكهربائي

المادة	الحرارية النسبية (ْم سم/وات)	سعة حرارية (جول/جمْم)	الكثافة (جم/سم)
ورق مغمور قبل التركيب (1-10 ك.ف)	650-500	1.37	1.252
ورق مغمور قبل التركيب (20-35 ك.ف)	550-500	1.37	1.252
ورق مغمور في التشغيل (1-10 ك.ف)	700-600	1.37	1.252
ورق مغمور في التشغيل (20-35 ك.ف)	600-550	1.37	1.252
ورق مغمور في كبلات غازية	700-650	-	-
ورق عزل كبلات زيتية	500-450	1.37	1.365-1.252
بولي اثيلين 20ْم بولي اثيلين 80ْم	400-300	2.3 3.7	0.95
بي في سي	700-600	1.6	1.25
مطاط	700-500	1.6-1.4	1.4
قطن نسيج	600-550	-	-
قطن نسيج مع شرائط تسليح	300	-	-
نسيج قطني غير مغمور	-	1.33	0.5
نحاس	0.27	0.378	8.8
ألومونيوم	0.48	0.92	2.7
رصاص	2.9	0.123	11.34
صلب	1.23-1.44	0.46-0.11	7.8
زيوت معدنية	900	1.66	0.9

$$S_{ins} = \sigma_{ns} / 2 \pi \, ln \, (R/r_o) / 2 \pi \qquad (2\text{-}3)$$

حيث يتحدد الفقد في العزل لوحدة الأحجام ولشريحة منه بسمك dr فنحصل علي

$$dp = \{ \frac{P_{ins}}{ln \, (R/r_o)} \}^2 \, (dr/r) \qquad (2\text{-}4)$$

ونتحول إلي معدل التغير الحراري والسريان الحراري عند نصف القطر r بالمعادلة

$$d\,\tau = p_k \, dS_r = P_{ins} \{ \frac{\sigma_k \ln(r/r_o)}{2 \pi \, ln \, (R/r_o)} \} \, (dr/r) \qquad (2\text{-}5)$$

وبالتالي نصل إلي حساب الفرق بين درجة الحرارة للقلب المعدني والجراب في الصورة النهائية

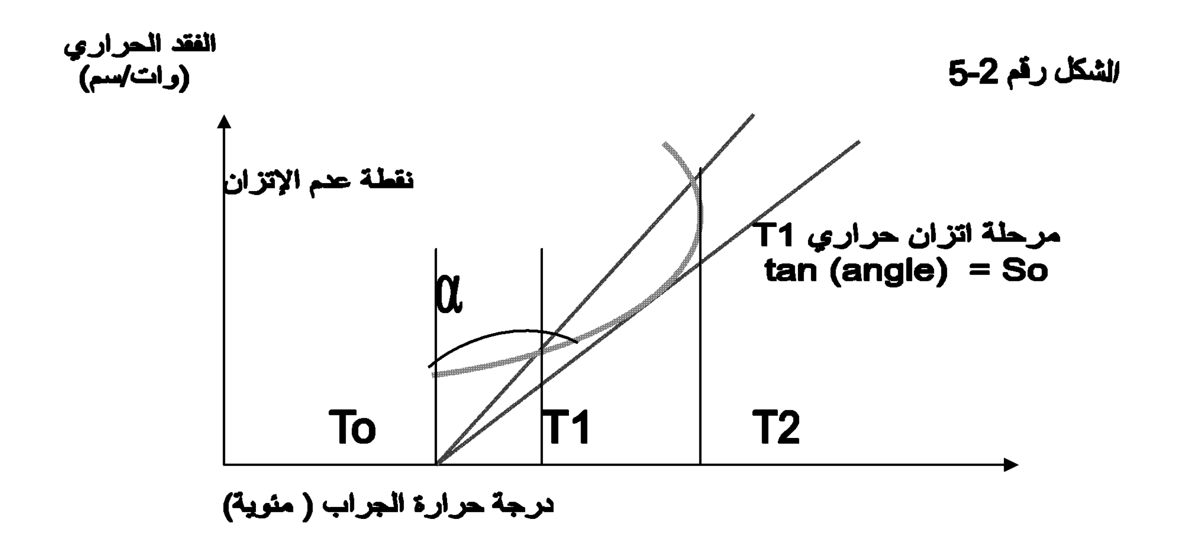
$$d\,\tau = (\sigma/2\pi) \, (P_{ins} /2) \ln(R/r_o) = S_k \, P_{ins} \, /2 \qquad (2\text{-}6)$$

ويبين أن المقاومة الحرارية النوعية للعزل الكهربائي تختلف تبعا لنوع المادة المستخدمة كما هو موضح في الجدول رقم 2-8.

الاتزان الحراري ضروري لضمان سلامة الكبل أثناء التشغيل ويقدم الشكل رقم 2 - 5 العلاقة بين حرارة الجراب والفقد الحراري في العزل وهو يتغير أسيا وكلما ارتفع الجهد زادت نسبة الانهيار الحراري بحدة ويتحدد الاتزان الحراري من خلال المنحنيات المعطاة في الشكل، ويحدث الانهيار الحراري للأسباب التالية:

1- **زيادة المقاومة الحرارية الخارجية عن القيمة المصمم عليها الكبل.**
2- **ارتفاع درجة حرارة الجو والوسط المحيط.**
3- **زيادة الحمل الكهربائي بالقدر المسبب ارتفاع درجة الحرارة.**

الشكل رقم 2-5



أما عن الكبلات خفيفة التيار والتي عادة لا تتأثر بدرجة الحرارة مثل كبلات القوي الكهربائية فنجد الجدول رقم 2 - 9 يوضح مقننات بعض هذه الكبلات للتيار الخفيف بينما أدرج الجدول رقم 2 - 10 المواصفات الفنية الخاصة بكبلات الاتصالات والتحكم الآلي وهي متعددة الأزواج.

الجدول رقم 2 - 9: بيان بكبلات تيار خفيف عزل بولي أثيلين وجراب PVC

البيان	عزل بجراب	كبلات تحكم أقل من 1 أ
أدنى مقاومة عزل (ميجا أوم كم)	1000	50
جهد احتبار متردد دقيقة (ك. ف.)	1	2
أقل قوة شد للعزل/ الجراب (كجم/مم^2)عند حرارة عادية نسبة التقادم (%)	1/1 85/80	1/1 85/85
أقل استطالة للعزل°90م لمدة 96 س / الجراب °100م لمدة 48 س (كجم/مم^2) نسبة التقادم (%)	100/300 80/60	120/100 80/80
أدنى مقاومة للزيت بالجراب°70م (الشد / استطالة %)	60/80	60/80
التوهين الحراري (أقصى تضاؤل سمك عند °120م (%)	50	50
اختبار الجراب لصدمة باردة (-°15م)	بدون خدش	بلا خدش

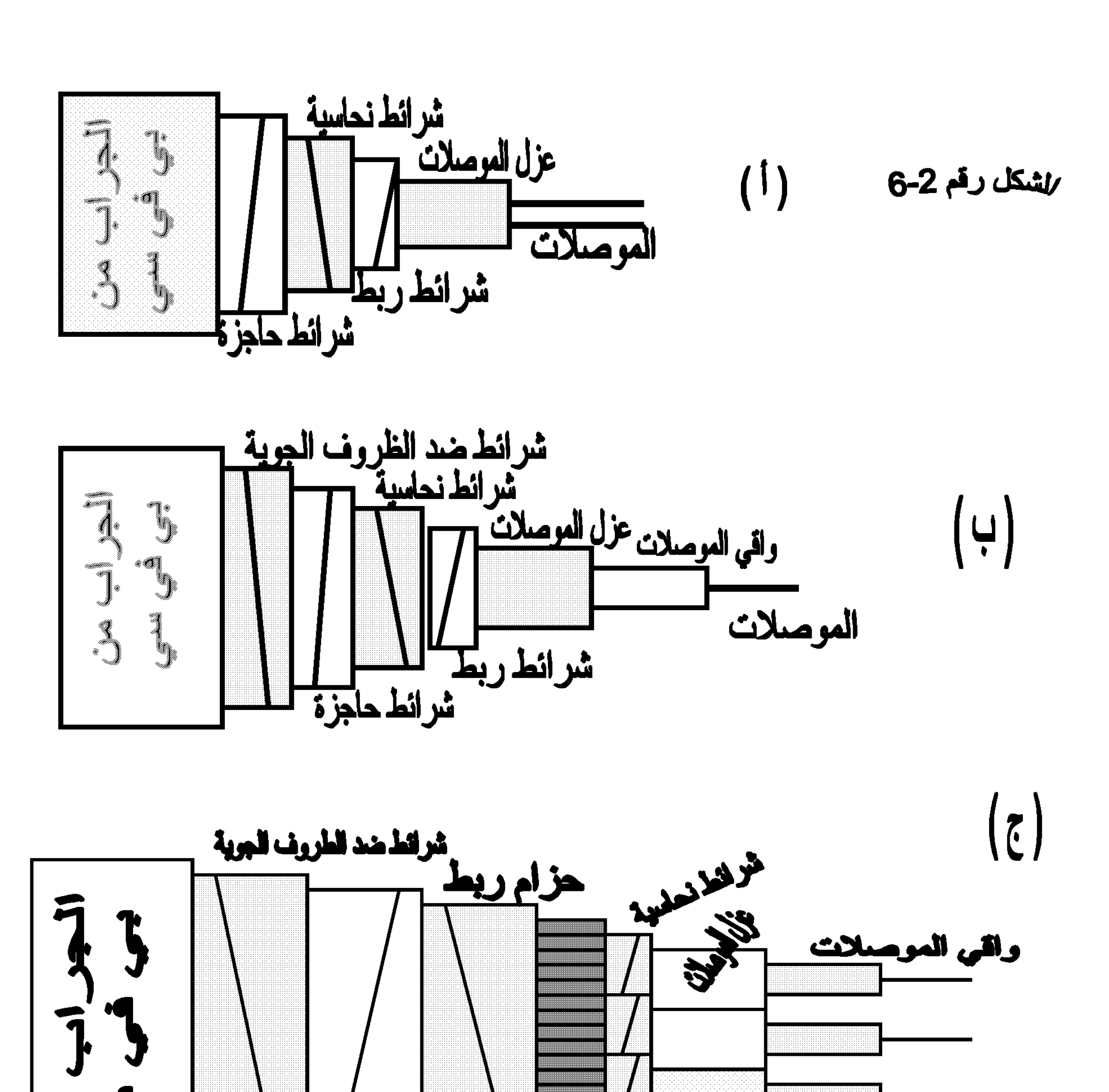
الجدول رقم 2 - 10: المواصفات الفنية بكبلات الاتصالات والتحكم متعددة الأزواج

عدد الأزواج	1	3	14	20	30	40
توزيع الطبقات (بالمركز)	1	-	-	-	-	-
طبقة أولي		3	4	2	4	2
طبقة ثانية			10	6	10	7
طبقة ثالثة				12	16	12
طبقة رابعة						19
ضفائر (عدد/مم)	/7	/7	/7	/7	/ 7	0.49/7
قطر (مم)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	1.47
	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	
سمك عزل (مم)	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
سمك شرائط الوقاية (مم)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
سمك الجراب (مم)	1.5	1.5	1.6	2	2.2	2.4
القطر الكلي (مم)	9.7	13.5	23	33	38	45
أقصى مقاومة للموصل (أوم/كم)	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
وزن الكبل (كجم/كم)	110	220	700	1240	1720	2270
الطول القياسي (م)	500	500	500	300	300	300

في هذه النوعية تجمع الضفائر في شكل دائري علي الطبقات المتتالية الداخلية ويجب ألا يقل سمك الجراب عن 85 % من القيمة المقننة بالنسبة للجراب الخارجي ويلزم ترتيب الأزواج تبعا للألوان فيها، أما عن نقل وتخزين الكبلات الكهربائية فيكون علي بكرات خشبية غير قابلة للدوران مغطاة ضد الظواهر الجوية والطبيعية أثناء التخزين والنقل والتركيب. كما يلزم تحديد البيانات الأساسية مثل: (مقنن الكبل – طول – الوزن – المصنع – العلامة التجارية – اتجاه السحب – أية بيانات أخرى)

يوضح الشكل رقم 2 - 6 الشكل العام لهذه النوعية من الكبلات الكهربائية، فالشكل (أ) يرض قطاعا طوليا بكبل أحادي القلب من النوع العادي ولكن لتقويته ضد الظروف المناخية والأرضية يضاف إليه

طبقة من الشرائط النحاسية الواقية له كما في الشكل (ب) ونفس الشكل ولكنه للكبل الكهربائي ثلاثي القلب في الشكل (ج).



الشكل رقم 6-2

الجدول رقم 2 - 11: الاختبارات الأساسية اللازمة لاختبار الكبلات جهد 10 ك. ف.

اختبارات روتينية	القيمة	اختبارات خاصة	القيمة
جهد اختبار 5 ق (ك. ف)	15	جهد 4 س (ك. ف.)	18
أقصى تفريغ جزئي عند 7.5 ك. ف. (pc)	20	اختبار سخونة 200°م	-
اختبار الشكل العام (كل تشغيلة)	لا يزيد عن 10 % من إجمالي أطوال العقد	أقصى استطالة للتحميل الكهربي	175 %
		أقصي استطالة مستديمة بعد التبريد	15 %
		أقل استطالة بالتبريد (-15°م)	20 %
		اختبار مفاجئ (-15°م)	لا شقوق بنسبة 6/5

3-2: إختبار الكبلات
Cable Testing

الاختبارات هي المقياس الهندسي السليم لتحديد صلاحية الكبل للتشغيل ويقدم الجدول رقم 2 - 11 الاختبارات الأساسية اللازمة لاختبار الكبلات الكهربائية جهد 10 ك. ف. وهي تتبع المواصفات القياسية وتبعا لعدد العينات اللازمة للاختبار (الجدول 2 - 12). أما الجدول رقم 2 - 13 فهو يجدول بيانات الكبلات الكهربائية أحادية القلب والمستخدمة في شبكات التوزيع الكهربائية طبقا للمواصفات القياسية الدولية IEC، بينما يقدم الجدول رقم 2 - 14 تلك البيانات للكبلات الكهربائية ثلاثية القلب.

الجدول 2 - 12: عدد العينات المطلوبة لاختبار الكبلات الكهربائية 10 ك. ف. بالمواصفات الدولية IEC تبعا لقيمة الأطوال الأساسية اللازمة

طول الكبل (كم)	عدد العينات المطلوبة	طول الكبل (كم)	عدد العينات المطلوبة
1 – 0	لا اختبار	40 – 20	2
20 – 4	1	60 - 40	3

الجدول رقم 2 - 13: البيانات الأساسية للكبلات الكهربائية أحادية القلب جهد التوزيع

مقطع (مم^2)/ عدد ضفائر	قطر القلب الخارجي (مم)	سمك العزل (مم)	سمك الجراب (مم)	القطر الكلي (مم)	أقصى مقاومة DC (أوم/كم)	وزن الكبل (كجم/كم)	طول اللفة (م)
70/ 19	9.9	3.4	1.7	23	0.268	1050	300
95/ 19	11.7		1.7	25	0.193	1300	200
120/ 37	13.2		1.8	27	0.153	1600	200
150/ 37	14.6		1.8	28	0.124	1900	200
185/ 37	16.3		1.9	30	0.0991	2300	200
240/ 61	18.7		2	33	0.0754	2850	150
300/ 61	20.9		2	35	0.0601	3500	150
400/ 61	6 .23		2.1	38	0.047	4350	150
800/ 91	35.1		2.5	50	0.0221	8800	150
1000 /127	39.9		2.6	55	0.0176	11000	150

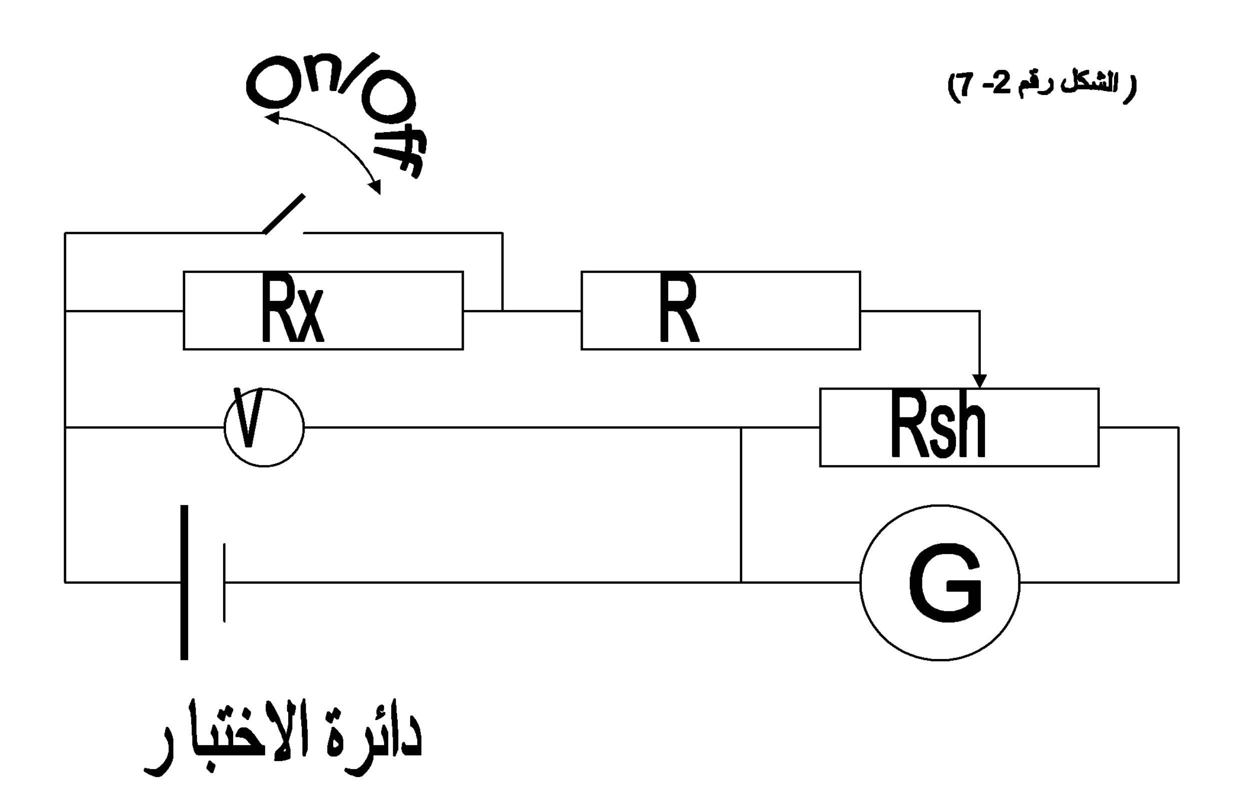
بالنسبة للاختبارات التي تخص الكبلات الكهربائية فهي متعددة وتشمل الاختبارات الكيميائية والحرارية والفيزيائية وكذلك الكهربائية وتلك الأخيرة سوف نسرد أنواعها إختصارا في السطور القادمة حيث أنها تنقسم إلي نوعين هما:

النوع الأول: إختبارات الإنتاج Production Tests

وهي التي تتم في المصنع أثناء عمليات الإنتاج وبالتالي تتم بعد كل مرحلة تصنيع لها وهي تهم المصنع وليس المستخدم أو القائم علي التركيب.

النوع الثاني: اختبارات تأكيد Control Tests

إختبارات التأكيد هي التي بدورها تتعدد إلي نوعين هما:



(الشكل رقم 2- 7)

1- اختبارات دائمة وتتم بصفة دورية Current Tests.

2- اختبارات بالعينة Sample Tests وهي ما تتم علي بعض العينات لأنها تدمر العينة وتصبح عير صالحة للاستخدام وتتبع المواصفات القياسية أيضا.

من أهم القياسات التي نحتاج إليها بالنسبة للتشغيل والصيانة هي تلك القراءات التي تخص أجزائه والتي نتناولها فيما يلي:

أولا : معاملات القلب المعدني Core Parameters

تمثل قيمة المقاومة الكهربائية r_c معاملا أساسيا ولهذا نستخدم هنا قنطرة كهربائية إما مفردة أو مزدوجة لقياس المقاومة لطول ما بقدر l متر ومقطع قدره S مم^2 أو لوحدة الأطوال منه كعينة وهي تتراوح بين 0.0001 – 100 أو م. كما يؤخذ في الاعتبار المعامل النوعي الحراري α وتحسب عند درجة حرارة محددة قدرها t حيث تقاس المقاومة الكبيرة بالقنطرة المفردة، وعموما تعمل دائرة الاختبار (الشكل رقم 2 - 7) بالحدود القياسية وهي مستوى الدقة عالي ولا يقل عن 1.0 بحساسية جلفانومتر تحت 1.5 % وانحراف لا يقل عن 1 مم وبحيث الا يزيد مجموع المقاومات لكل التوصيلات بالدائرة عن 0.02 أوم. ومن ثم تقاس المقاومة النوعية ρ بالمعادلة:

$$\rho = \frac{r_c \; S}{[1 + \alpha (t - 20)] \, l} \tag{2-7}$$

ويجب تمرير التيار في اتجاهين معكوسين أو عكس اتجاه الكبل والحصول علي القيمة المتوسطة average للقراءتين.

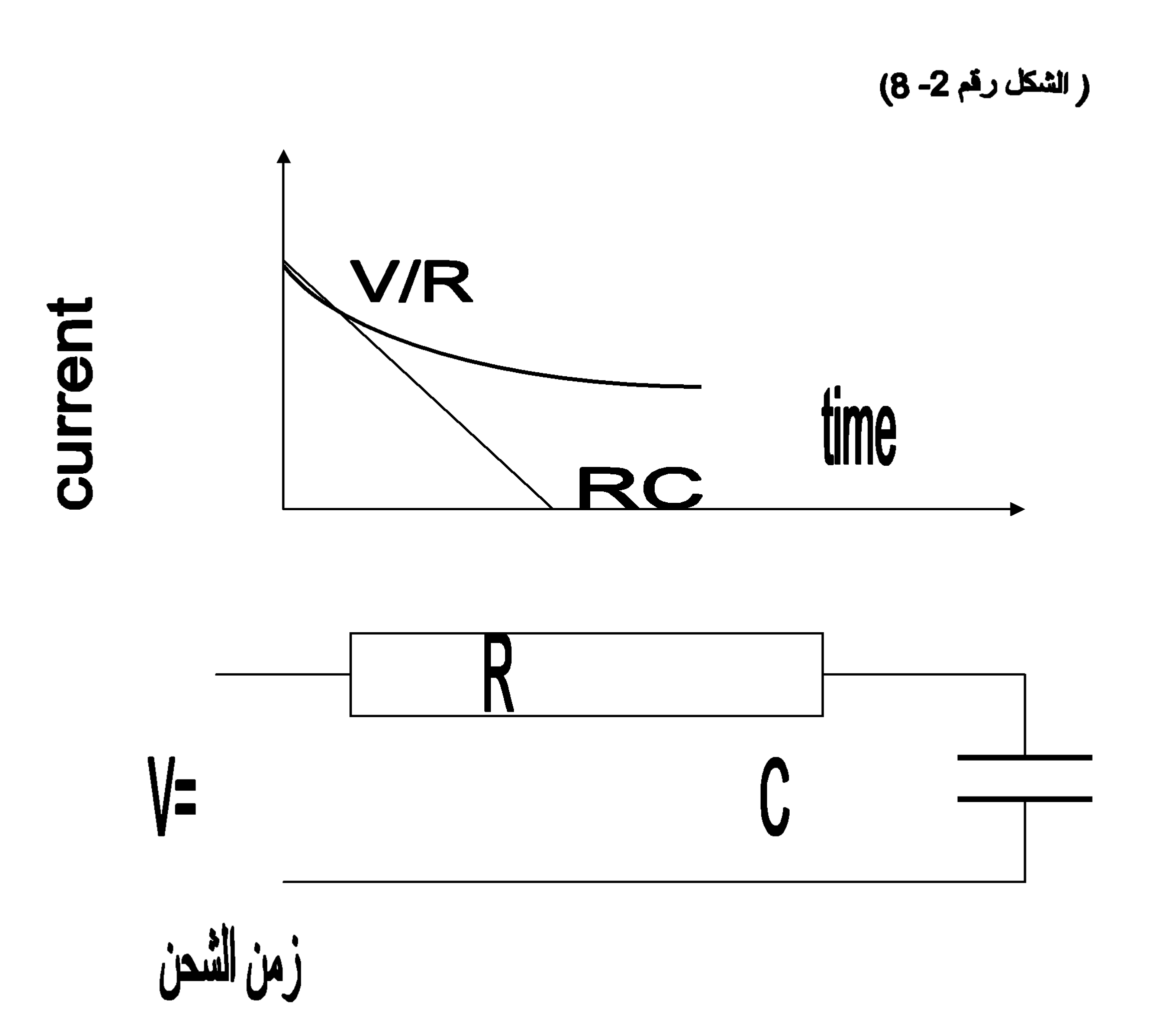
ثانيا: قياس معاملات العزل Insulation Parameters

تنحصر معاملات العزل في ثلاث قيم هي المقاومة R_x والسعة C ε وزاوية الفقد tan δ، وتعطي الدائرة الكهربائية بالشكل 2 - 8 خطوات العمل حيث يغلق المفتاح مع انتظار دقيقة علي الأقل ثم قراءة

انحراف الجلفانومتر بقيمة α_{st} والحصول علي رقم التوازي N_{st} . وهي تعبر عن المقاومة القياسية بالدائرة ويكون التيار قيمته هي:

$$I_{st} = A \quad \alpha_{st} \quad N_{st} \tag{2-8}$$

(الشكل رقم 2- 8)



ثم يفتح المفتاح وتؤخذ القراءتين α_x ، N_x مرة أخرى ويصبح التيار بالقيمة

$$I_x = A \quad \alpha_x \quad N_x \tag{2-9}$$

والنسبة بين التيارين تأخذ الصيغة

$$\frac{I_{st}}{I_x} = \frac{\alpha_{st}\ N_{st}}{\alpha_x\ N_x} \tag{2-10}$$

ونعبر بعد ذلك عن المقاومة بالصيغة

$$R_x = R\,(1 - I_{st} / I_x) = R\,(1 - \alpha_{st} N_{st} / \alpha_x N_x) \tag{2-11}$$

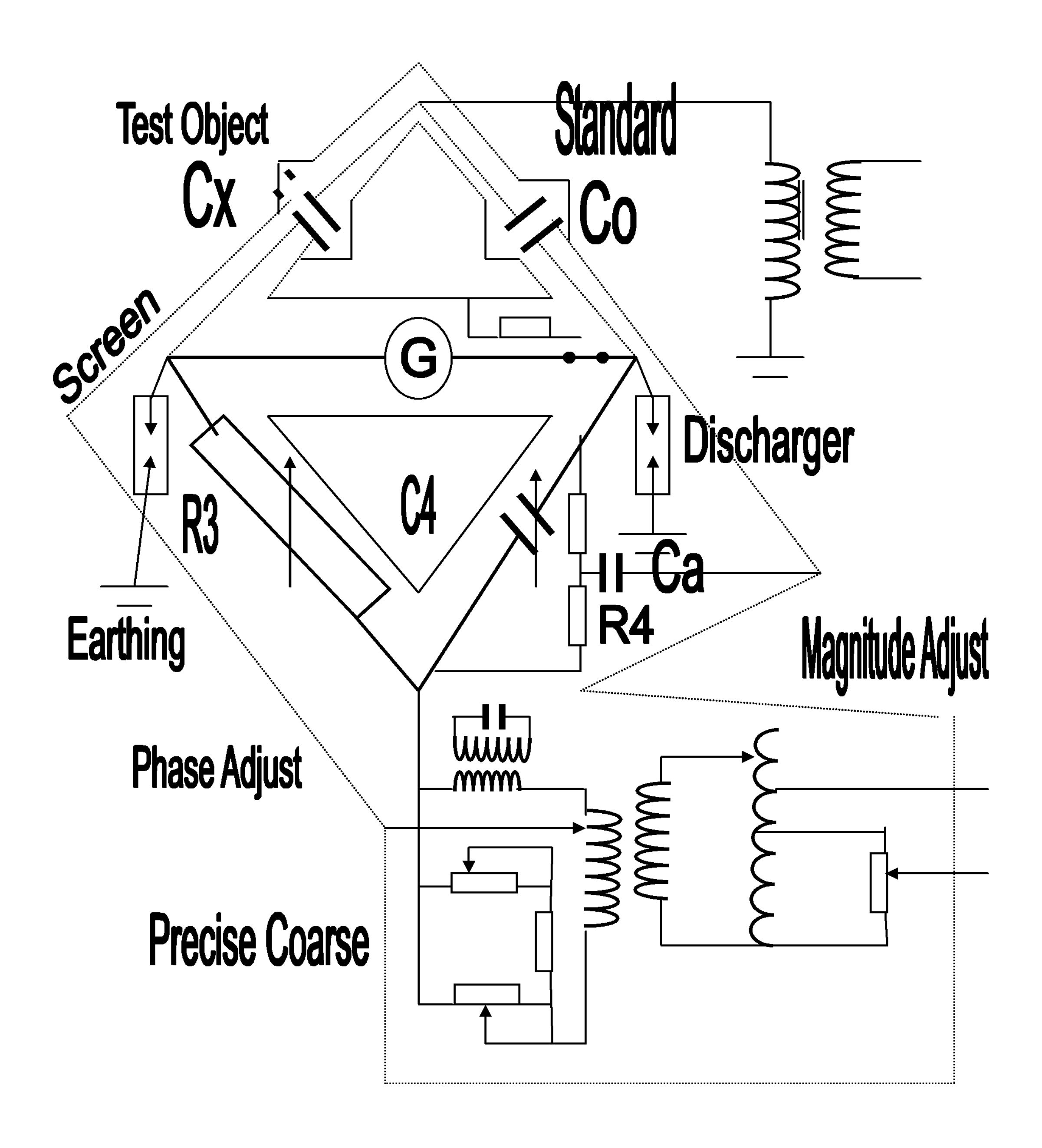
عند $\alpha_{st}\ N_{st} >> \alpha_x\ N_x$ مما يعني إمكانية إهمال الوحدة ا لصحيحة فنحصل علي

$$\frac{R_x}{R} = \frac{\alpha_{st}\ N_{st}}{\alpha_x\ N_x} \tag{2-12}$$

تؤخذ قراءة الجلفانومتر بعد دقيقة من قفل الدائرة (الشكل رقم 2 - 9) لتواجد السعة C والمقاومة R وصولا إلي الاستقرار الكهربائي نتيجة تيار الشحن I_{ch} والذي يظهر عند الجهد V مع التيار المستمر.

$$I_{ch} = \frac{V}{R\ e^{-t/RC}} \tag{2-13}$$

كما يجب أن تختبر الكبلات الكهربائية ذات العزل المطاطي أو البلاستيك بعد وضعها في وعاء مائي وتكون مغمورة بالكامل كي تقاس مقاومة العزل القلب والماء (الأرض). كما يمكن الاستعانة بالميجر لقياس المقاومة R_{60}/R_{15} لتحديد المقاومة والتي تبلغ 10^{12} أوم مع الأخذ في الاعتبار أن الميجر يعطي خطأ يصل إلي 20 % وهو عالي.



الشكل رقم 2 - 9 : دائرة الاختبار

ثالثا: السعة Capacitance

تستخدم طريقة المقارنة Comparison Method بمكثف قياسي Standard Capacitance محدد القيمة من قبل وهو دائما بقيمة 0.1 ميكروفاراد حيث تشحن الدائرة مع التيار المستمر ويبدأ قياس القيم تبعا لما سبق شرحه بالنسبة للمقاومة ونعتبر أن الجهد ثابت ولم يتغير في الحالتين مع إدخال رمز السعة بدلا من المقاومة ونحصل علي العلاقة:

$$\frac{C_x}{C_{st}} = \frac{\alpha_x \; N_x}{\alpha_{st} \; N_{st}} \qquad (2\text{-}14)$$

منها نصل إلي قيمة السعة المطلوبة لطول من الكابل l كم وهي

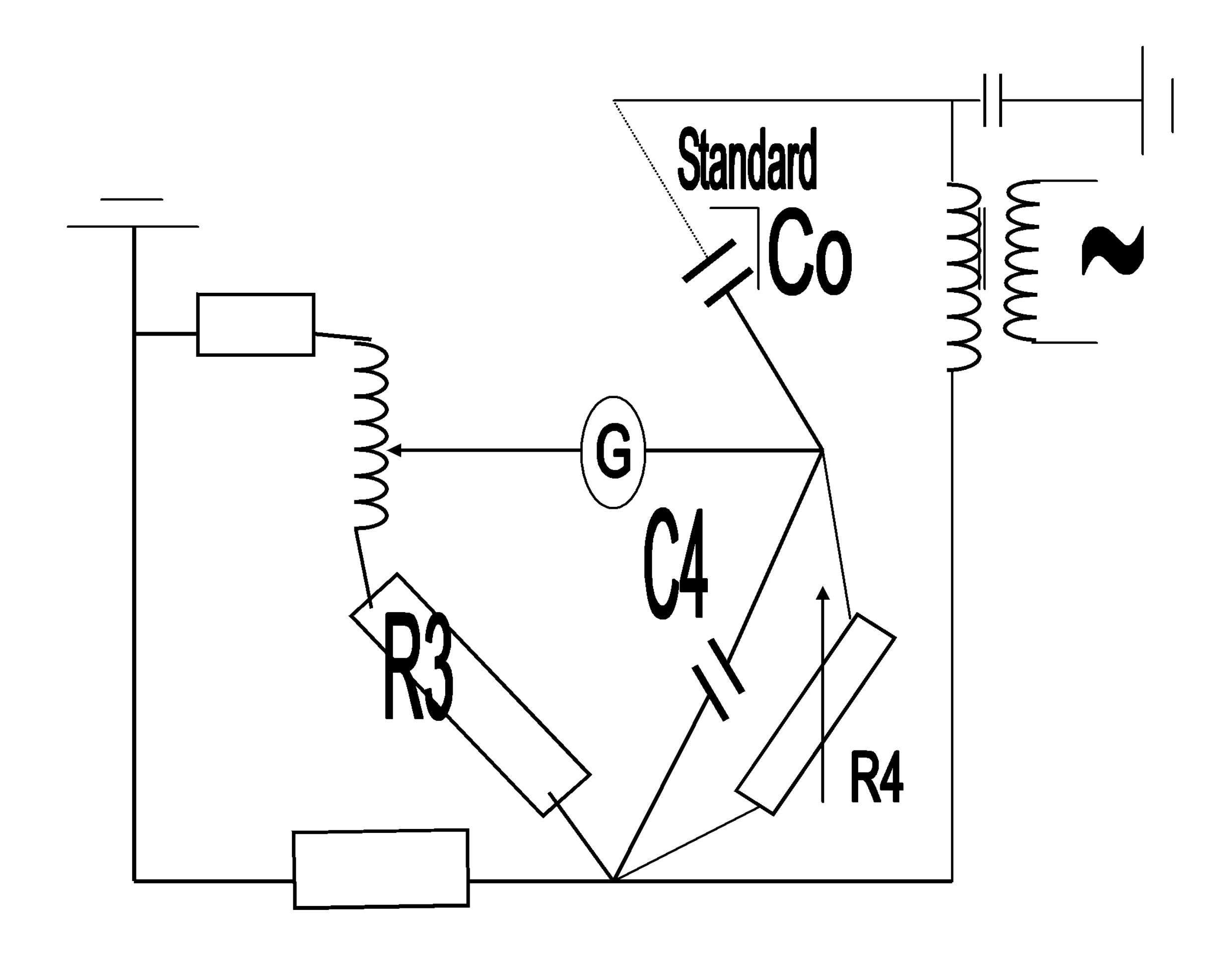
$$C_x = \frac{C_{st}}{l} \times \frac{\alpha_x \; N_x}{\alpha_{st} \; N_{st}} \qquad (2\text{-}15)$$

رابعا: زاوية الفقد Loss Angle

تمثل الدائرة البسيطة (القنطرة) والمعطاة في الشكل رقم 2 - 10 الاختبار اللازم لقياس زاوية العزل وهو من أهم أنواع الاختبارات ومن الشكل يجب أن تضبط قيمة المقاومة R_3 والسعة C_4 كي يشير مؤشر الجلفانومتر إلي الصفر أي بدون انحراف Deflection عند الذبذبة f وبهذا نحصل علي السعة وزاوية الفقد في حالة الاتزان بالصيغة:

$$\tan \delta = 2 \pi f C_4 R_4$$

$$C_x = \left\{ \frac{C_0 R_4}{R_3} \right\} \left[\frac{1}{1 + \tan^2 \delta} \right]$$



الشكل 2 - 10 : دائرة الاختبار بالقنطرة

كما أنه من المعروف أن قيمة زاوية الفقد $\tan\delta$ عادة تقل عن 0.1 وبالتالي المربع لها يكون أقل من 0.01 ومن ثم تصبح القيمة $1 + \tan^2\delta$ مساوية للوحدة أيضا علي وجه التقريب فتكون السعة المطلوبة هي:

$$C_x = \{C_o \ R_4 / R_3\} \qquad (2\text{-}16)$$

محمد حامد

من الجهة الأخرى المقاومة لها قيمة قياسية نختارها دائما كي نحصل علي أبسط تعبير عن الزاوية هي ($10000/\pi$) أوم فنحصل علي زاوية الفقد بدلالة السعة بوحدات الميكروفاراد في الصورة:

$$\tan \delta = C_4$$

تصلح هذه الدائرة لاختبار كلا من الكبلات الكهربائية وملفات المحولات الكهربائية، ويستخدم أيضا المكبرات الإلكترونية للعينات الصغيرة حيث تنخفض حساسية القنطرة بشدة مع انخفاض الجهد وسعة العينة فيتم تصميم دائرة المكبر كي تمنع الشوشرة والتداخل مع أجهزة القياس عندما يتولد مجال كهرومغناطيسي أثناء عملية الاختبار. هكذا تصبح القراءة أكثر دقة حيث نحتاج إلي الجهد والذبذبة المستقران ويجب أن تختفي أشكال التوهين distorsion من موجة الجهد، ولهذا يتم تغذية المحول من مجموعة محرك / مولد مخصوص ويتم التحكم في الجهد من خلال المهيج. كما أنه من حيث المبدأ يلزم التأكد المستمر من اتزان الدائرة الكهربائية وعادة ما يكون الخطأ في السعة أقل من 0.5 % وللزاوية أقل من 1.5 %.

بالنسبة لعزل ملفات محولات الجهد العالي واختبارها مع الأرض فتكون السعة المختبرة هي:

$$C_{xo} = C_x + C_{ex}$$

يمكن الحصول علي زاوية الفقد الخارجي من الزاوية $\tan \delta_{ex}$ بالاستعانة بالمعادلة

$$\tan \delta = \frac{\{C_{xo} \tan \delta_{xo} - C_{ex} \tan \delta_{ex}\}}{[C_{xo} - C_{ex}]} \qquad (2\text{-}17)$$

أخيرا نحتاج بالضرورة إلي اختبار الكبل مع درجة الحرارة المرتفعة لنرى تأثير درجة الحرارة Heat Effect علي العزل وفيه تقل المقاومة R من تأثير الملفات الثانوية للمحول المستخدم للتسخين. إضافة إلي أن هذه الدائرة يجب أن تكون محاطة بشبكة مؤرضة تماما Screened وهو المولد الحراري للعزل حيث يتم الاختبار عند درجة حرارة 50 أو 70 حسب المواصفات.

الجدول رقم 2 - 14: البيانات الأساسية لكبلات ثلاثية بجهد التوزيع

مقطع(مم^2)/عدد ضفائر	قطر القلب (مم)	سمك عزل (مم)	سمك جراب (مم)	قطر كلي (مم)	أقصى مقاومة (أوم/كم)	وزن (كجم/كم)	طول اللفة (م)
19/70	9.9	3.4	2.5	47	0.268	3400	300
19/95	11.7		2.6	51	0.193	4300	300
37/120	13.2		2.7	56	0.153	5300	200
37/150	14.6		2.8	59	0.124	6200	200
37/185	16.3		2.9	63	0.0991	7400	200
61/240	18.7		3.1	69	0.0754	9300	150
61/300	20.9		3.3	74	0.0601	11300	150
61/400	23.6		3.5	80	0.047	14000	150

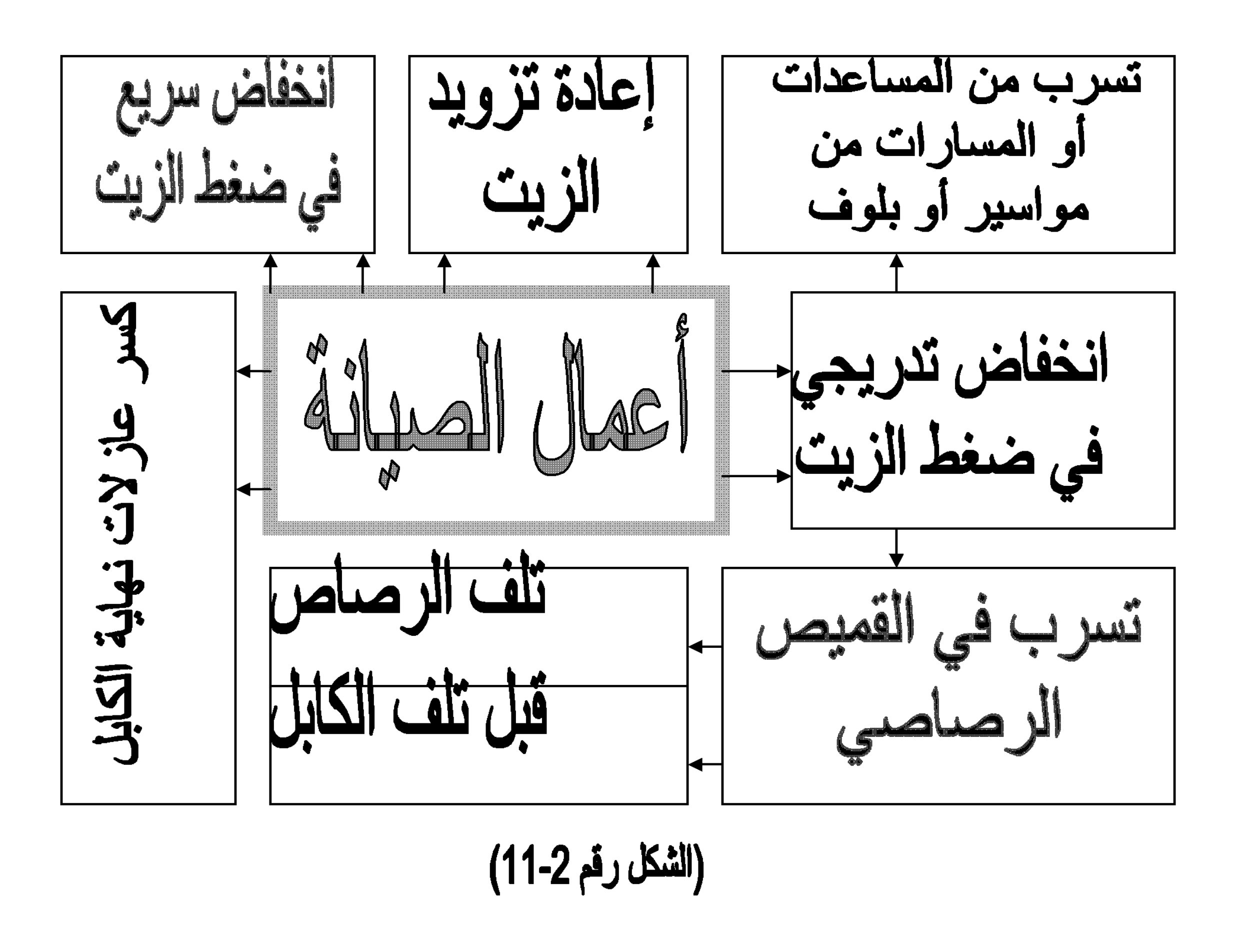
أهم أعمال الصيانة تتبع نتائج الإختبار علي جميع مستويات الجهد أما عن الكبلات الكهربائية ثلاثية القلب والمستخدمة أيضا في التوزيع الكهربائي فنجد المقننات الجوهرية لها قد جدولت في الجدول رقم 2 - 14 وتأتي تفاصيل القطاع الداخلي لهذه النوعية في الشكل رقم 2-6.

2-4: صيانة الكبلات الزيتية

صيانة الكبلات الكهربائية من أول الأعمال الهندسية التي تحتاج إلي الرعاية الفنية ونأخذ هنا الكبلات الزيتية مثالا لتوضيح العمل في الصيانة وكيفية التعامل معها عموما ونضعها في عدة محاور نفصلها في السطور القادمة:

المحور الأول: مبادئ الصيانة

تعتبر الكبلات الزيتية من أهم أنواع الكبلات الكهربائية لأنها متناولة في أيدي المارة عابرين وعاملين في الشوارع والأراضي الفضاء ولهذا نأخذ وضعا أوليا في العمل بها أو عند الاقتراب منها ويلزم اتباع قواعد الأمن الصناعي في هذا الشأن وأهمها:



(الشكل رقم 2-11)

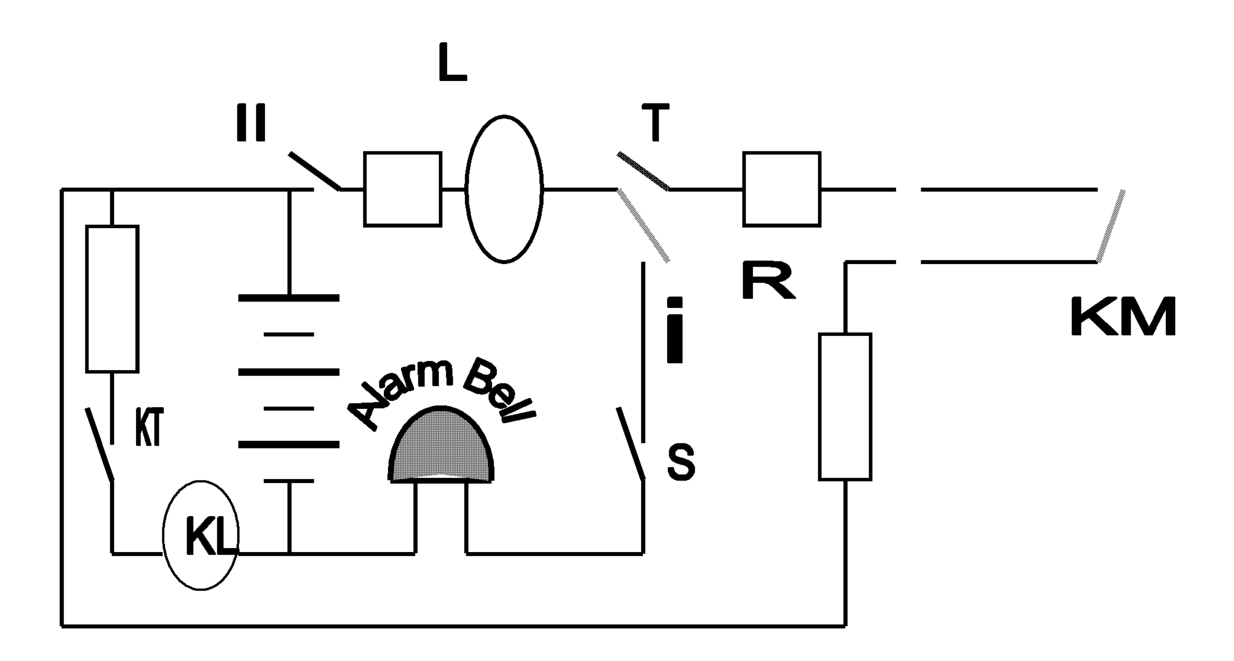
1- من أول مبادئ الأمن الضناعي تأتي ظاهرة الوقاية من أخطاء الغير حيث يلزم عمل لوحات رسم تنفيذية (طبقا للواقع as built drawings) ثلاثية الأبعاد وتسليمها لجهات الاختصاص وتلك المعنية.
2- المتابعة الجيدة وهي عبارة عن تفتيش هندسي وتحليل القراءات الفنية الدورية وبيانات الأحمال الكهربائية ومتابعة حالة دوائر الفصل التلقائي والبطاريات المغذية لها واختبار أجهزة القياس للتأكد من سلامتها.
3- الصيانة الدورية وهي هامة لعلاج القصور وتلافي العيوب.
4- أعمال الصيانة الشاملة ويقدم الشكل رقم 2 - 11 التصنيف العام لأعمال الصيانة بالنسبة للكبلات الكهربائية الزيتية.

المحور الثاني: نوعيات الصيانة

مستوي الزيت بالكبل يكون أعلي من 0.3 كجم/سم^2 ومنع ضخ الزيت بالكبل إلا بالأسلوب الهندسي السليم لمنع دخول الهواء إلي داخل الزيت، كما تستخدم دوائر ثانوية تعمل بالتيار المستمر لتحديد مستوى الضغط والزيت في كل خزان علي طول المسار. مع ضرورة الاعتماد علي الوصلات الفنية اللازمة لحماية نهايات الكبل من التأثيرات الميكانيكية المختلفة، وهو ما يجب مراعاته عند وصل الكبلات الكهربائية، ونضع الحالات الرئيسية لمفهوم هذه الأعمال في السطور القادمة.

1- دوائر الإنذار بالخلل في ضغط الزيت.

يقوم الزيت تحت الضغط العالي كعزل عالي المستوى وأي تقليل في قيمة الضغط يؤثر بشدة علي هذا المستوى، ومن ثم يجب القياس المستمر للضغط مع الاشارة التلقائية بمجرد الاقتراب من حدود الخطر. وتعمل هذه الدوائر بجهد 48 ف مستمر قدرة 20 ملي أمبير ويتم التوصيل من خلال كبلات التحكم تبعا لطول مسافة الكبل (جدول رقم 2-15). تمثل الدائرة الحالة المعتادة في التشغيل فتكون دائرة الجرس مفتوحة بينما المبين مضيئا أما م الخطأ يضئ المبين من خلال المفتاح والوصلة تعبر عن مانومتر لقياس الضغط والذي يعطي الأمر إلي المتمم كي يعمل.



منعا للتداخل مع الدوائر المتجاورة يتم الاستعانة بالكبلات الكهربائية المحورية ويتم حماية الدائرة ضد التسرب الأرضي كما نشير إلي أن التحميل الزائد يؤدي إلي رفع ضغط الزيت أعلي القيمة الأقصى نتيجة التمدد الطبيعي في حجم الزيت ويمثل له حد يجب ألا يزيد عنه بل ويجب الإنذار عنه (الشكل رقم 2 - 12).

الجدول رقم 2 – 15: بيان بقطر الموصل تبعا لطول الكبل

قطر السلك (مم)	أقصى مسافة للكبل (كم)
0,6	6
0.8	10
0.9	14

2- حالة كسر في العازل بنهاية الكبل.

تعتبر حالة غير خطيرة ولكن من الأفضل التغيير السريع للعزل المكسور.

3- انخفاض مفاجئ في ضغط الزيت.

يلزم التأكد من سلامة أجهزة القياس مثل المانومتر وفصل التيار الكهربي عن الكبل وعزل الخزانات إذا كان هناك تسريب سريع للزيت من الكبل ويجب اختبار الزيت للكسر الكهربي.

4- تزويد الكبل بالزيت.

عند انخفاض الزيت في الخزان يلزم تزويد الكبل بالزيت ولكن لها من الشروط الفنية والهندسية العديدة والهامة للحفاظ علي مستوى العزل داخل الكبل وهو ما يمكن أن يتم من خلال الضخ إلي الخزان الاحتياطي أو الضخ المباشر إلي الكبل.

5- التسرب التدريجي للزيت في الكبل.

هذه الحالة تعطي احتمالان: أن يكون التسريب من المساعدات أو المواسير والمحابس (البلوف) أو من القميص الرصاصي ويجب أن يختفي التسريب وعودة ضغط الزيت إلي المقنن (الشكل رقم 2 - 12).

المراجع

محمد حامد : التركيبات الكهربائية – الهيئة العامة للأبنية التعليمية – القاهرة – 1998

محمد محمد حامد : الأحمال الكهربائية – القاهرة – 2000

محمد محمد حامد : الصيانة الكهربائية – الهيئة العامة للأبنية التعليمية - القاهرة – 2001

G. G. Tiranovsky: Mechanisms of Cable Works in Energy Projects, Vol. 437, Energia, Moscow, 1976.

V. Manoilov: Electricity and Human, Mir Publisher, Moscow, 1975.

V. Manoilov: Fundamentals of Electric Safety, Mir Publisher, Moscow, 1975.

ASEA Brown Boveri: Vacuum Circuit Breakers, Manual, Germany, 2001.

V. Privezentsev et al: Fundamentals of Cable Engineering, Mir Publisher, Moscow, 1973.

AEI Cables Limited: Cables with Reduced Smoke, Toxicity and Fire Protection, Paris, France, 1984.

رقم الإيداع 14901 / 2001